

การคัดกรองปัจจัยที่มีผลต่อความหยابผิวและการสึกหรอของเครื่องมือตัด
ในกระบวนการกัดวัสดุอูมิเนียมหล่อแบบกึ่งของแข็ง A356



นางสาวอังศุมารินทร์ ประภาสพงษ์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ปีการศึกษา 2559

**THE SCREENING OF MACHINING PARAMETERS
ON SURFACE ROUGHNESS AND TOOL WEAR
IN THE END-MILLING PROCESS OF
ALUMINUM SEMI-SOLID A356**

Aungsumarin Prapaspong



**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the
Degree of Master of Engineering in Manufacturing Engineering**

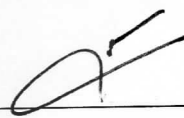
Suranaree University of Technology

Academic Year 2016

การคัดกรองปัจจัยที่มีผลต่อความหยาบพิวและการสึกหรอของเครื่องมือตัด
ในกระบวนการกัดวัสดุโลหะแบบกึ่งของแข็ง A356

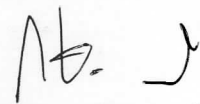
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นักศึกษานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



(อ.ดร.วรรณนัช นุ่งสุต)

ประธานกรรมการ



(ผศ.ดร.กัญชลา สุดตาชาติ)

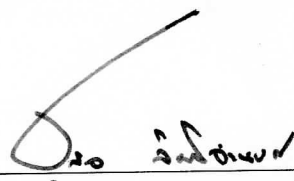
กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)



(อ.ดร.สมศักดิ์ ศิวดำรงพงศ์)

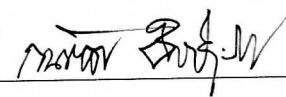
กรรมการ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



(ศ.ดร.ชูกิจ ลิมปิจำนงค์)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและนวัตกรรมการ



(รศ.ร.อ.ดร.กนต์ธร ชำนิประศาสน์)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

อังศุมารินทร์ ประภาสพงษ์ : การคัดกรองปัจจัยที่มีผลต่อความหยาบผิวและการสึกหรอ
ของเครื่องมือตัดในกระบวนการกัดวัสดุอลูมิเนียมหล่อแบบกึ่งของแข็ง A356 (THE
SCREENING OF MACHINING PARAMETERS ON SURFACE ROUGHNESS AND
TOOL WEAR IN THE END-MILLING PROCESS OF ALUMINUM SEMI-SOLID
A356) อาจารย์ที่ปรึกษา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กัญชลา สุดตาชาติ, 132 หน้า

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ เพื่อคัดกรองปัจจัยที่มีอิทธิพลหลักต่อความหยาบผิวและ
การสึกหรอของเครื่องมือตัด ในกระบวนการกัดวัสดุอลูมิเนียมหล่อแบบกึ่งของแข็ง A356 เนื่องจาก
ความหยาบผิว คือ ตัววัดที่สำคัญในการบ่งบอกถึง คุณภาพของการผลิตชิ้นงาน ในขณะที่
การสึกหรอของเครื่องมือตัด ก็เป็นปัจจัยที่สำคัญในด้านต้นทุนการผลิต ซึ่งผลที่ได้จากการวิจัยนี้
สามารถนำไปประยุกต์ในอุตสาหกรรมการผลิตชิ้นส่วนประกอบยานยนต์ ในงานวิจัยนี้ชิ้นงาน
ทดสอบผลิตด้วยกรรมวิธีการผลิตโลหะกึ่งของแข็งโดยใช้วิธี Gas Induced Semi-Solid Squeezed
Casting (GISS-SC) และกระบวนการทางความร้อน T6 การศึกษานี้ได้ดำเนินการ โดยใช้เครื่องกัด
ซีเอ็นซีแบบแนวตั้ง (CNC) กระบวนการกัดใช้ดอกกัด (End Mill) คาร์ไบด์ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง
12 มิลลิเมตร ในการกัดปาดหน้า โดยนำหลักการออกแบบการทดลองแบบหนึ่งส่วนแปดแฟรคชัน
แฟกทอเรียลมาเป็นแบบการทดลอง การวิจัยครั้งนี้ได้คัดกรองจำนวน 7 ปัจจัย ประกอบด้วยปัจจัย
ในการตัดเฉือน 4 ปัจจัย ได้แก่ อัตราป้อนต่อฟัน, ความเร็วตัดเฉือน, ความลึกของการตัด
ในแนวรัศมี และความลึกของการตัดในแนวแกน และปัจจัยที่เกี่ยวกับรูปร่างของเครื่องมือตัด
3 ปัจจัย ได้แก่ มุมคายเศษ, มุมเกลียว และจำนวนคมตัด การทดลองนี้ใช้เครื่องกัดซีเอ็นซีที่ภายใต้
สภาวะการตัดเฉือนแบบแห้ง

ผลการคัดกรองปัจจัยที่มีอิทธิพลหลักต่อความหยาบผิวพบว่า ปัจจัยหลัก คือ
อัตราป้อนต่อฟัน, จำนวนคมตัด, มุมคายเศษ, ความเร็วตัดเฉือน และความลึกในการตัดในแนวรัศมี
ส่งผลต่อความหยาบผิวอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 ส่วนผลการคัดกรองปัจจัยที่มีอิทธิพล
หลักต่อการสึกหรอของเครื่องมือตัดพบว่า ปัจจัยหลัก คือ จำนวนคมตัด อัตราป้อนต่อฟัน
ความลึกในการตัดในแนวรัศมี และความลึกในการตัดในแนวแกนส่งผลต่อความหยาบผิวอย่างมี
นัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05

AUNGSUMARIN PRAPASPONG : THE SCREENING OF MACHIINING
PARAMETERS ON SURFACE ROUGHNESS AND TOOL WEAR IN THE
END-MILLING PROCESS OF ALUMINUM SEMI-SOLID A356. THESIS
ADVISOR : ASST. PROF. KANCHALA SUDTACHAT, Ph.D., 132 PP.

END-MILLING/MACHIINING PARAMETERS/SURFACE ROUGHNESS/TOOL WEAR

This purposes of the research was to screen the main factors influencing surface roughness and tool wear in the end-milling process of aluminum semi-solid A356. The surface roughness is known as very important factor to measure the quality of manufacturing parts. Moreover, tool wear is also very important in term of economic consideration. The results of this research could be applied in manufacturing of automotive components industry. The work pieces of this research were produced by Gas Induced Semi-Solid Squeezed Casting (GISS-SC) and T6 heat treatment process. This study was conducted by using computer numerical controlled (CNC) milling machine. The milling process used carbide end mill cutter of 12 millimeter diameter was used in face milling. The one eight fraction factorial design of experimental method was carried out. Seven main factors in this study consist of four cutting factors as follow : feed per tooth, cutting speed, radial depth of cut and axial depth of cut. The rest were three geometry of tool factors including : rake angle, helix angle and number of teeth. This experiment was carried out using CNC milling machine on dry cutting condition.

The results of the main factors screening on surface roughness showed that the main effect of factors were feed per tooth, number of teeth, rake angle, cutting speed and radial depth of cut had significantly effect on surface roughness with a significance level of 0.05. The results of the main factors screening on tool wear showed that the main effect of factors were the feed per tooth, number of teeth, radial depth of cut and axial depth of cut had significantly effect on surface roughness with a significance level of 0.05.



School of Manufacturing Engineering

Academic Years 2016

Student's Signature อัครินทร์

Advisor's Signature กบ-จ

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สามารถสำเร็จลงด้วยดี เนื่องจากได้รับความช่วยเหลืออย่างดียิ่ง ทั้งด้านวิชาการและด้านการดำเนินงานวิจัย จากบุคคลและกลุ่มบุคคลต่างๆ ได้แก่

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กัญชลา สูดาศาดี อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์บัณฑิตซึ่งได้ให้ความช่วยเหลือแนะนำปรึกษาต่าง ๆ อันเป็นประโยชน์อย่างยิ่งในการทำวิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต

อาจารย์ ดร.สมศักดิ์ ศิวดำรงพงศ์ ที่ให้คำแนะนำปรึกษา ช่วยเหลือในการวิจัยครั้งนี้ให้สำเร็จลงตามเป้าหมายที่วางไว้และให้กำลังใจแก่ผู้วิจัยมาโดยตลอด รวมทั้งช่วยตรวจทานและแก้ไขวิทยานิพนธ์เล่มนี้จนเสร็จสมบูรณ์

ขอขอบคุณ คุณสหัสชัย ทิพยเนตร, คุณพิเชษฐ์ เผือกแดง และคุณคมสัน ภายหลัง วิศวกร ประจำศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ช่วยอำนวยความสะดวกทางด้านเครื่องมือและอุปกรณ์ ขอขอบคุณพี่น้องบัณฑิตศึกษาทุกท่าน โดยเฉพาะอย่างยิ่ง คุณอุกฤษฏ์ ธนทรัพย์ทวี ที่ให้คำแนะนำปรึกษาด้านวิชาการและให้กำลังใจมาโดยตลอด

ขอบคุณ บริษัท ทูล เมเนจเม้นท์ จำกัด ที่ให้ความช่วยเหลือและอำนวยความสะดวกในการสั่งทำเครื่องมอดเพื่อการดำเนินงานวิจัย วิทยานิพนธ์ฉบับนี้

สุดท้ายนี้ ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา ครอบครัว ที่ให้การเลี้ยงดู อบรมสั่งสอน และให้กำลังใจในการศึกษาครั้งนี้ให้ประสบความสำเร็จตามเป้าหมายที่วางไว้

อังศุมารินทร์ ประภาสพงษ์

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ง
สารบัญ.....	จ
สารบัญตาราง.....	ซ
สารบัญรูป.....	ฅ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ.....	ฉ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของการวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	3
1.3 สมมติฐานของการวิจัย.....	3
1.4 ขอบเขตของการวิจัย.....	3
1.5 ตัวแปรที่ใช้ในการทดสอบ.....	4
1.6 ผลที่คาดว่าจะได้รับ.....	5
1.7 นิยามคำศัพท์.....	5
2 ปรัชญ่วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	7
2.1 โลหะอลูมิเนียม.....	7
2.1.1 โลหะผสมหล่ออลูมิเนียม (3xx.xx).....	11
2.1.2 อลูมิเนียมหล่อหมายเลข A356.....	11
2.2 กระบวนการหล่อโลหะกึ่งของแข็ง.....	13
2.3 ขั้นตอนการบ่มแข็ง (Age Hardening).....	15
2.3.1 ขั้นตอน Solution Treatment.....	15
2.3.2 ขั้นตอน Quenching.....	17
2.3.3 ขั้นตอน Aging.....	17

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.4	งานกัด.....	18
2.4.1	อิทธิพลที่มีผลต่อการตัดเฉือน.....	19
2.4.2	เครื่องกัดซีเอ็นซี.....	22
2.5	ความหยาบผิว (Surface Roughness).....	28
2.5.1	ลักษณะของพื้นผิว.....	28
2.5.2	มาตรวิทยาการวัดความหยาบผิว.....	28
2.6	การสึกหรอในเครื่องมือกล.....	29
2.6.1	กลไกของการสึกหรอ.....	31
2.6.2	ชนิดการสึกหรอของเครื่องมือตัดบนคมตัด.....	33
2.6.3	ข้อกำหนดในการวัดขนาดของการสึกหรอบนผิวหลบ (Flank Wear).....	35
2.7	การทดลองและการออกแบบการทดลอง.....	37
2.7.1	คำศัพท์ที่ควรรู้จักเกี่ยวกับการทดลอง.....	38
2.7.2	การออกแบบการทดลอง.....	41
2.7.3	การออกแบบการทดลองแบบแฟรคชันนัลแฟคทอเรียล.....	45
2.8	งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	51
3	วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการดำเนินการวิจัย.....	56
3.1	วัสดุและอุปกรณ์.....	56
3.1.1	วัสดุที่ใช้ในการวิจัย.....	56
3.1.2	อุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย.....	58
3.2	วิธีการดำเนินการวิจัย.....	62
3.2.1	ทบทวนวรรณกรรมและศึกษาปัจจัยที่เกี่ยวข้อง.....	64
3.2.2	การศึกษาระดับปัจจัยที่ใช้ในการศึกษา.....	64
3.2.3	ออกแบบการทดลอง.....	67
3.2.4	การเตรียมชิ้นงานก่อนการดำเนินการทดลอง.....	68
3.2.5	ดำเนินการทดลอง.....	69
3.2.6	การเก็บรวบรวมข้อมูล.....	74

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.2.7 การวิเคราะห์ข้อมูล.....	75
4 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ข้อมูล.....	76
4.1 ผลการทดลองและการวิเคราะห์การทดลองที่ 1 การทดลองเพื่อ คัดกรองปัจจัยที่มีอิทธิพลหลักต่อความหยาบผิว.....	76
4.2 ผลการทดลองและการวิเคราะห์การทดลองที่ 2 การทดลองเพื่อ คัดกรองปัจจัยที่มีอิทธิพลหลักต่อการสึกหรอของเครื่องมือตัด.....	82
4.3 ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลต่างๆที่ได้จากการทดลอง.....	88
5 สรุปและอภิปรายผลการวิจัย.....	91
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	91
5.2 การอภิปรายผลการทดลอง.....	93
5.3 ข้อเสนอแนะ.....	95
รายการอ้างอิง.....	96
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก. ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบความหยาบผิวของอลูมิเนียมหล่อ แบบกึ่งของแข็งหมายเลข A356.....	99
ภาคผนวก ข. ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบขนาดการสึกหรอของเครื่องมือตัด.....	105
ภาคผนวก ค. ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบส่วนผสมทางเคมีของอลูมิเนียมหล่อ แบบกึ่งของแข็งหมายเลข A356.....	111
ภาคผนวก ง. ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบโครงสร้างจุลภาคของอลูมิเนียมหล่อ แบบกึ่งของแข็งหมายเลข A356.....	113
ภาคผนวก จ. การเขียนโค้ดโปรแกรมกระบวนการกัดสำหรับเครื่องซีเอ็นซี.....	116
ภาคผนวก ฉ. บทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่.....	124
ประวัติผู้เขียน.....	132

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1	แสดงสัญลักษณ์กลุ่มอลูมิเนียมหล่อผสม.....8
2.2	แสดงสัญลักษณ์การทำเทมเปอร์ (Tempering).....10
2.3	แสดงค่าความเร็วตัดของวัสดุชนิดต่าง ๆ.....20
2.4	แสดงค่าอัตราป้อนสามารถดูได้จากคู่มือมาตรฐาน.....22
2.5	แสดงจำนวนทรีทเมนต์คอมบิเนชันในการออกแบบการทดลองแบบ 2^k แฟคตอเรียล และการออกแบบการทดลองแบบแฟรคชันนัลแฟคตอเรียลแสดงส่วนผสมทางเคมี ของอลูมิเนียม A356.....46
2.6	แสดงจำนวนทรีทเมนต์คอมบิเนชันในการออกแบบการออกแบบการทดลอง แบบแฟรคชันนัลแฟคตอเรียล.....47
2.7	แสดงได้ผลการออกแบบการทดลองแบบแฟรคชันนัลแฟคตอเรียล 2^{7-3}50
2.8	แสดงงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับความหยาบผิวของอลูมิเนียม.....51
2.9	แสดงงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการสึกหรอของเครื่องมือตัด.....54
3.1	แสดงส่วนผสมทางเคมีของอลูมิเนียมหล่อแบบกึ่งของแข็งหมายเลข A356 ที่ใช้ในการทดลอง.....56
3.2	แสดงระดับค่าตัวแปรต่าง ๆ ที่ต้องการศึกษา.....67
3.3	แสดงค่าเฉลี่ยของความหยาบผิวที่วัดได้จากการทดลอง.....67
3.4	แสดงผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง.....69
4.1	แสดงผลการวัดค่าความหยาบผิวโดยเฉลี่ยของการทดลองที่ 1-16.....77
4.2	แสดงการวิเคราะห์ความแปรปรวน (analysis of variance, ANOVA).....79
4.3	แสดงผลการวัดขนาดการสึกหรอบนผิวหลักโดยสูงสุดของการทดลองที่ 1-16.....83
4.4	แสดงการวิเคราะห์ความแปรปรวน (analysis of variance, ANOVA).....85

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1	แสดง flat-end mill..... 4
2.1	แสดงแผนภาพสมดุลภาคโลหะผสมอลูมิเนียม-ซิลิกอน-แมกนีเซียม..... 12
2.2	แสดงโครงสร้างจุลภาคของโลหะกึ่งของแข็ง(ซ้าย) เปรียบเทียบกับกรหล่อทั่วไป(ขวา)..... 13
2.3	แสดงสมบัติของแท่งอลูมิเนียมกึ่งของแข็งที่ตัดด้วยมือ โดยใช้แรงเพียงเล็กน้อยก็ขึ้นรูปได้..... 14
2.4	แสดงกรรมวิธีการผลิตโลหะกึ่งของแข็งโดยวิธี Gas Induced Semi-Solid..... 14
2.5	แสดงขั้นตอนการบ่มแข็งของโลหะผสมอลูมิเนียม-ซิลิกอนหล่อเกรด A356..... 15
2.6	แสดงความสามารถในการละลายของธาตุซิลิกอนและแมกนีเซียมภายในเนื้อเมตริกซ์ กับอุณหภูมิ..... 16
2.7	แสดงลักษณะของการกัด..... 18
2.8	แสดงหลักการควบคุมการทำงานของเครื่องจักรกล CNC..... 24
2.9	แสดงแนวแกนของเครื่องกัดซีเอ็นซี..... 25
2.10	แสดงรูปทรงของเครื่องมือตัด (ดอกกัดเอ็นมิลล์)..... 26
2.11	แสดงอุปกรณ์จับยึดเครื่องมือ (Tools Holder)..... 27
2.12	แสดงปลอกจับ (Collet)..... 27
2.13	แสดงค่าความหยาบผิวเฉลี่ยของพื้นผิวตามอนุกรมเลขคณิต..... 29
2.14	แสดงชิปที่ถูกฉีกออกมา (a) Discontinuous chips (b) Continuous chips (c) Continuous chips with “Built up edge” 30
2.15	แสดงการสึกหรอแบบแนบติด (Adhesive Wear)..... 31
2.16	แสดงการสึกหรอจากการแพร่ (Diffusion Wear)..... 32
2.17	แสดงการสึกหรอแบบขัดถู (Abrasive Wear)..... 33
2.18	แสดงชนิดการสึกหรอของเครื่องมือตัดบนคมตัด..... 35

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.19	แสดงการแบ่งเขตการสึกหรอบนผิวหอบ (Flank Wear).....36
2.20	แสดงการวัดขนาดการสึกหรอบนผิวหอบ.....36
2.21	แสดงรูปแบบระบบการทดลองทั่วไป.....37
3.1	แสดงขนาดวัสดุชิ้นงานก่อนทำการทดลอง.....57
3.2	แสดงโครงสร้างจุลภาคของอลูมิเนียมหล่อแบบกึ่งของแข็งหมายเลข A356.....57
3.3	แสดงดอกกัดเอ็นมิลล์ (End mill).....58
3.4	แสดงเครื่องขัดผิวชิ้นงานแบบจานหมุน.....58
3.5	แสดง Micro Vicker.....59
3.6	แสดง Spectrometer.....60
3.7	แสดงเครื่องกัดซีเอ็นซี.....60
3.8	แสดงเครื่องวัดความหยาบผิว.....61
3.9	แสดง Optical Microscope.....62
3.10	แสดงขั้นตอนการดำเนินงาน.....63
3.11	แสดงผลการทดลองระดับค่าปัจจัยของอัตราป้อนต่อฟัน.....65
3.12	แสดงผลการทดลองระดับค่าปัจจัยของความเร็วตัดเฉือน.....65
3.13	แสดงผลการทดลองระดับค่าปัจจัยของมุมคายเศษ.....66
3.14	แสดงการกัดปาดผิวหน้าอลูมิเนียมหล่อแบบกึ่งของแข็งหมายเลข A356.....70
3.15	แสดงตำแหน่งวัดผลความหยาบผิว 2 แบบ แบ่งตามความลึกในแนวรัศมี 6 มิลลิเมตร(ก)และ 3 มิลลิเมตร(ข).....71
3.16	แสดงคาบเวลาเครื่องมือก่อนวัดเสมอ.....72
3.17	แสดงขั้นตอนการดำเนินการทดลอง.....73
3.18	แสดงการวัดขนาดการสึกหรอบนผิวหอบ.....74
4.1	แสดงที่น่าจะเป็นแบบปกติของตัวประมาณของอิทธิพลทั้งหมด.....78
4.2	แสดงแผนภาพอิทธิพลหลัก ในการทดสอบความหยาบผิว.....81
4.3	แสดงที่น่าจะเป็นแบบปกติของตัวประมาณของอิทธิพลทั้งหมด.....84

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่

หน้า

4.4	แสดงแผนภาพอิทธิพลหลัก ในการทดสอบการสึกหรอของเครื่องมือตัด.....	87
4.5	แสดงผลการวิเคราะห์ General Regression ที่ได้จากโปรแกรม Minitab.....	88
4.6	แสดงแผนภาพการกระจายตัวของข้อมูลระหว่างความหยาบผิว กับการสึกหรอของเครื่องมือตัด.....	89
4.7	แสดงการเทียบระหว่างลักษณะการพอกเศษแบบ ก. รอบที่ 1 กับ ข. รอบที่ 40.....	90



คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

CNC	=	computer numerical controlled คือ คอมพิวเตอร์หรือไมโครโปรเซสเซอร์ สำหรับใช้ควบคุมการทำงาน
GISS	=	Gas Induced Semi-Solid
T6	=	เป็นการทำ Solution Heat Treated, Quenching แล้วทำ Artificially Aged
OM	=	optical microscope
Fz	=	อัตราป้อนต่อฟัน
Vc	=	ความเร็วตัดเฉือน
Ap	=	ความลึกในการกัดตามแนวแกน
Ae	=	ความลึกในการกัดตามแนวรัศมี
Rake	=	มุมคายเศษ
Helix	=	มุมเกลียว
Z	=	จำนวนคมตัด
Ra	=	ความหยาบผิวเฉลี่ยของพื้นผิวตามอนุกรมเลขคณิต
Ra1	=	ความหยาบผิวเฉลี่ยของพื้นผิวตามอนุกรมเลขคณิตจำนวนการกัด 1 รอบ
VB	=	ขนาดการสึกหรอบนผิวหลัก
VB40max	=	ขนาดการสึกหรอบนผิวหลักสูงสุด จำนวนการกัด 40 รอบ
Temp	=	อุณหภูมิขณะดอกกัดเอ็นมิลล์ทำการตัดเฉือน
μm	=	ไมโครเมตร หรือ ไมครอน ($1 \text{ ไมครอน} = 1 \times 10^{-6} \text{ เมตร}$)
$^{\circ}\text{C}$	=	องศาเซลเซียส
HV	=	Vickers hardness
mm	=	มิลลิเมตร ($1 \text{ มิลลิเมตร} = 1 \times 10^{-3} \text{ เมตร}$)
m	=	เมตร
min	=	นาที
rev	=	รอบหมุน
ISO	=	International Organization for Standardization คือ องค์การมาตรฐานสากล
ASM	=	American Society of Metals

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

DOE	=	design of experiment
ANOVA	=	analysis of variance
StdOrder	=	ลำดับการทดลองตามมาตรฐาน
RunOrder	=	ลำดับการทดลองตามการทำการทดลอง
SS_R	=	ความแปรปรวนที่สามารถอธิบายได้ด้วยตัวแบบถดถอย
SS_T	=	ความแปรปรวนของข้อมูลทั้งหมด
SS	=	sum of squares
DF	=	degree of freedom
MS	=	mean squares
F	=	ค่าที่ใช้พิจารณาใน F-distribution
P	=	ค่าสถิติที่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ .05
T	=	ค่าที่ใช้พิจารณาใน T-distribution



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของการวิจัย

ในปัจจุบันนี้อลูมิเนียมเป็นโลหะนอกกลุ่มเหล็กที่มีบทบาทในอุตสาหกรรมต่าง ๆ อย่างกว้างขวางและมีปริมาณการใช้งานเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ทั้งนี้เนื่องจากมีความสามารถในการหล่อขึ้นรูปได้ง่าย ด้านทานการกัดกร่อน ทนต่อการสึกหรอ มีความแข็งและความแข็งแรงสูง และมีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนต่ำ ไม่เป็นสนิม สามารถทำการเชื่อมได้ สามารถเพิ่มความแข็งด้วยวิธีการอบชุบ ที่สำคัญอลูมิเนียมมีน้ำหนักเพียง 1 ใน 3 ของเหล็กกล้า แต่เมื่อคิดเป็นอัตราส่วนความแข็งแรงต่อน้ำหนักแล้วอะลูมิเนียมมีความแข็งแรงสูงกว่าเหล็กมาก และอะลูมิเนียมทำการตัดเฉือนได้ง่ายและขึ้นรูปได้ดี (ณรงค์ศักดิ์ ธรรมโชติ, 2556) จึงทำให้มีความต้องการในตลาดอุตสาหกรรมเป็นอย่างมาก

อลูมิเนียมผสมหล่อส่วนมากจะมีซิลิกอนเป็นธาตุผสมหลักซึ่งทำให้หลอมได้ง่าย ไหลตัวได้ดีและมีความสามารถในการหล่อหลอมที่ดีมาก อลูมิเนียมผสมหล่อมีกรรมวิธีการผลิตหรือการขึ้นรูปที่หลากหลาย ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับรูปแบบของผลิตภัณฑ์และปัจจัยอื่นร่วมด้วย โดยส่วนใหญ่เป็นการขึ้นรูปแบบดั้งเดิม (Liquid Casting Process) (เจษฎา วรรณสินธุ์, 2009) ซึ่งการขึ้นรูปลักษณะดังกล่าว จะเกิดเกรนแบบกิ่งไม้ (Dendrite) ในโครงสร้างจุลภาค ส่งผลให้ชิ้นงานเกิดการหดตัว (Shrinkage) เนื่องจากมีรูพรุนของอากาศแทรกอยู่ในโครงสร้างจุลภาค ซึ่งลักษณะดังกล่าวส่งผลให้มีสมบัติทางกลที่ด้อยลง ต่อมาการศึกษาเทคโนโลยีการหล่อโลหะ กึ่งของแข็ง (Semi-Solid Metal Casting) ของนักวิจัยและภาคอุตสาหกรรมทั่วโลก ซึ่งได้นำมาประยุกต์ใช้ร่วมกับกระบวนการหล่อแบบต่าง ๆ (เจนณรงค์ นาคเทวัญ, 2555) และหนึ่งในนั้นก็มีกระบวนการผลิตโลหะกึ่งของแข็งของนักวิจัยชาวไทยจากภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ (รอมฎอน บรูพา, รั้งสินี แคนยุกต์, เจษฎา วรรณสินธุ์, 2552) โดยใช้เทคนิค GISS (Gas Induced Semi-Solid) โดยการ

แก๊สในโตรเจนลงไปใต้น้ำโลหะที่หลอมเหลวจะทำให้เกิดโครงสร้างเกรนเป็นแบบก้อนกลม (Globular Grain)

โครงสร้างภายในรวมตัวกันแน่นขึ้นและมีโพรงอากาศน้อยลง ส่งผลให้มีสมบัติทางกลที่ดีขึ้นรวมถึงการตอบสนองต่อกระบวนการทางความร้อนได้ดียิ่งขึ้น (เจษฎา วรรณสินธุ์, 2552) ในปี 2009 สิริพรและคณะได้ทำการศึกษาอิทธิพลของตัวแปรในกระบวนการทางความร้อนที่มีผลต่อสมบัติทางกลและโครงสร้างจุลภาคของอลูมิเนียมหล่อแบบกึ่งของแข็ง A356 โดยใช้เทคนิค GISS และกระบวนการทางความร้อนที่ใช้คือ T5 และ T6 พบว่า กระบวนการทางความร้อนแบบ T6 ให้ค่าความแข็งสูงที่สุดที่ 149.90 HV มีความต้านทานแรงดึงสูงที่สุดที่ 297.07 MPa และมีเปอร์เซ็นต์การยืดตัวมีค่าเท่ากับ 9.66 % ถือว่า เป็นการเพิ่มทางเลือกให้กับผู้ผลิตชิ้นส่วนต่าง ๆ ได้เป็นอย่างดี (ศิริกุล วิสิทธิ์เมธากรและสิริพรชันทองคำ, 2552)

โลหะผสมอลูมิเนียม-ซิลิกอน เกรด A356-T6 เป็นเกรดที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมยานยนต์และชิ้นส่วนประกอบยานพาหนะกันอย่างแพร่หลาย เช่น ชิ้นส่วนเครื่องยนต์ ล้อรถยนต์ ใช้เครื่องยนต์ไฮดรอลิก และแผงคอนโทรลไฮดรอลิก เนื่องจากมีความเหนียวและความแข็งแรงต่อน้ำหนักสูง ทำให้มีความต้องการในตลาดอุตสาหกรรมเป็นจำนวนมาก โดยเน้นเรื่องน้ำหนักของวัสดุเป็นปัจจัยที่สำคัญที่สุด ซึ่งผลิตภัณฑ์เหล่านี้ต้องผ่านกระบวนการตัดเฉือนด้วยเครื่องจักรที่ความถูกต้องและความเที่ยงตรงสูงเป็นองค์ประกอบสำคัญ ซึ่งความเที่ยงตรงจะวัดกันที่ความสำเร็จของชิ้นงานว่าอยู่ในช่วงพิสัยความเผื่อและความหยาบของผิวงานตามที่กำหนด ความหยาบของผิวงาน อาจจะทำให้จำกัดความว่า เป็นความไม่สม่ำเสมอหรือความไม่เรียบ ซึ่งไม่สามารถหลีกเลี่ยงได้ในกรรมวิธีการผลิตโดยการตัดเฉือนซึ่งกระทำการบนเครื่องจักรโดยความหยาบของผิวงาน เป็นตัววัดที่สำคัญในด้านคุณภาพการผลิตที่มีผลต่อประสิทธิภาพของวัสดุ เพราะอาจจะทำให้เกิดปัญหาบางอย่างที่สำคัญ เช่น การเสื่อมสภาพของพื้นผิวที่มีคุณภาพซึ่งทำให้ลดความทนทานและความแม่นยำของผลิตภัณฑ์ เพราะพื้นผิวมีผลกระทบต่อคุณสมบัติทางกล เช่น ความล้า ความต้านทานการกัดกร่อน ในการผลิตชิ้นงานให้ได้ขนาดรูปร่างและความละเอียดผิวที่เหมาะสม เราใช้เทคนิคการกำจัดเนื้อวัสดุออกจากผิว จนกระทั่งได้เป็นชิ้นงานสำเร็จพร้อมใช้งาน ซึ่งการสึกหรอของเครื่องมือตัดเฉือน ก็เป็นอีกปัญหาที่มีความสำคัญ เนื่องจากทุกครั้งที่เครื่องมือตัดเฉือนเกิดการสึกหรอก็จะส่งผลกระทบต่อความแม่นยำและผิวของชิ้นงานจึงมีความจำเป็นที่จะต้องเปลี่ยนใหม่ ซึ่งถือว่าเป็นต้นทุนการผลิตที่ต่อเนื่องและมีมูลค่าสูงมากในอุตสาหกรรมการผลิตชิ้นส่วนต่าง ๆ

จากเหตุผลดังกล่าวผู้วิจัยจึงสนใจที่จะศึกษาการคัดกรองปัจจัยที่มีอิทธิพลหลักต่อความหยาบของผิวงานและส่งผลต่อการสึกหรอของเครื่องมือตัดในกระบวนการกัดวัสดุอะลูมิเนียมหล่อแบบกึ่งของแข็ง A356 ที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการ GISS โดยกำหนดปัจจัย 7 ปัจจัย ประกอบด้วย ปัจจัยในการตัดเฉือน 4 ปัจจัย ได้แก่ อัตราป้อนต่อฟัน, ความเร็วตัดเฉือน, ความลึกของการตัดในแนวรัศมี และความลึกของการตัดในแนวแกน และปัจจัยรูปร่างของเครื่องมือตัด 3 ปัจจัย ได้แก่ จำนวนคมตัด, มุมเกลียว และมุมคายเศษ ซึ่งคาดว่าจะจะเป็นประโยชน์กับอุตสาหกรรมยานยนต์และอุตสาหกรรมผลิตชิ้นส่วนต่าง ๆ เพื่อลดต้นทุนในการผลิต ลดเวลาการผลิต และเพิ่มคุณภาพการผลิตมากขึ้นแก่ภาคอุตสาหกรรมการผลิตชิ้นส่วน

1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย

เพื่อคัดกรองปัจจัยที่มีอิทธิพลหลักต่อความหยาบผิวและการสึกหรอของเครื่องมือตัดในกระบวนการกัดวัสดุอะลูมิเนียมหล่อแบบกึ่งของแข็ง A356 โดยใช้เทคนิคการออกแบบการทดลอง

1.3 สมมติฐานของการวิจัย

สมมติฐานของการวิจัย คือ

1.3.1 การคัดกรองปัจจัยที่คาดว่า ปัจจัยที่มีอิทธิพลหลักต่อค่าความหยาบผิวในกระบวนการกัดวัสดุอะลูมิเนียมหล่อแบบกึ่งของแข็ง A356-T6 ที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการ GISS โดยไม่ใช้สารหล่อเย็น (Dry Cutting) คือ อัตราป้อนต่อฟันและจำนวนคมตัด

1.3.2 การคัดกรองปัจจัยที่คาดว่า ปัจจัยที่มีอิทธิพลหลักต่อการสึกหรอของเครื่องมือตัดในกระบวนการกัดวัสดุอะลูมิเนียมหล่อแบบกึ่งของแข็ง A356-T6 ที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการ GISS โดยไม่ใช้สารหล่อเย็น (Dry Cutting) คือ อัตราป้อนต่อฟัน, จำนวนคมตัด, ความลึกของการตัดในแนวรัศมี และความลึกของการตัดในแนวแกน

1.4 ขอบเขตของการวิจัย

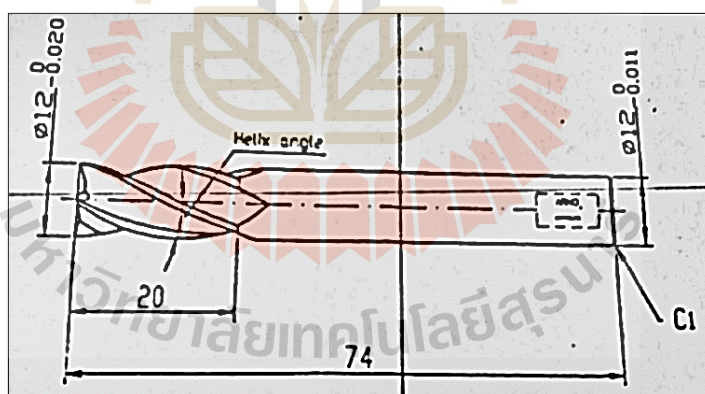
1.4.1 ทำการศึกษาและวิจัย โดยใช้เครื่องกัด ซีเอ็นซี Bridgeport รุ่น VMC-500 16 คอนโทรล HAIDENHAIN รุ่น TNC 410M ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

1.4.2 วัสดุชิ้นงานที่ใช้ในการทดสอบ คือ อะลูมิเนียมหล่อแบบกึ่งของแข็งหมายเลข A356 ที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการหล่อ GISS

1.4.3 ทำการศึกษาและวิจัย โดยใช้ดอกกัดเอ็นมิลล์ (End mill) ที่ผลิตจากคาร์ไบด์ ชนิด 2-flute และ 3-flute แบบ flat-end mill มีลักษณะดังรูปที่ 1.1 คือ มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 มิลลิเมตร ความยาวของใบมีด 20 มิลลิเมตร และความยาวของดอกกัดทั้งหมด 74 มิลลิเมตร โดยบริษัทผู้ผลิต คือ ARNO

1.4.4 ประยุกต์ใช้เทคนิคการออกแบบการทดลอง เพื่อคัดกรองปัจจัยที่มีอิทธิพลหลักต่อความหยาบผิวและการสึกหรอของเครื่องมือตัดในกระบวนการกัดวัสดุอะลูมิเนียมหล่อแบบกึ่งของแข็ง A356 ที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการ GISS โดยไม่ใช้สารหล่อเย็น (Dry Cutting)

1.4.5 ใช้การออกแบบการทดลองแบบแฟรคชั่น $1/8$ ของ 2^k แฟกตอเรียล (The One-Eighth Fraction of The 2^k Design หรือ 2^{k-3} Factorial Design) โดยมี ปัจจัย 7 ปัจจัยประกอบด้วยปัจจัยในการตัดเฉือน 4 ปัจจัย ได้แก่ อัตราป้อนต่อฟัน, ความเร็วรอบ, ความลึกของการตัดในแนวรัศมี และความลึกของการตัดในแนวแกน และปัจจัยที่เกี่ยวกับรูปร่างของเครื่องมือตัด 3 ปัจจัย ได้แก่ จำนวนคมตัด, มุมเกลียว และมุมคายเศษ โดยทำการทดลองที่ 2 ระดับปัจจัย



รูปที่ 1.1 flat-end mill

1.5 ตัวแปรที่ใช้ในการทดสอบ

1.5.1 ตัวแปรต้นประกอบด้วย

1.5.1.1 ปัจจัยการตัดเฉือน

- อัตราป้อนต่อฟัน (Feed per Tooth)

- ความเร็วตัดเฉือน (Cutting Speed)
- ความลึกของการตัดในแนวรัศมี (Radial Depth of Cut)
- ความลึกของการตัดในแนวแกน (Axial Depth of Cut)

1.5.1.2 ปัจจัยรูปร่างของเครื่องมือตัด

- มุมคายเศษ (Rake Angle)
- มุมเกลียว (Helix Angle)
- จำนวนคมตัด (Number of Teeth)

1.5.1.3 วัสดุชิ้นงานที่ใช้ในการทดสอบ คือ อลูมิเนียมหล่อแบบกึ่งของแข็ง หมายเลข A356-T6 ที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการ GISS

1.5.2 ตัวแปรตามประกอบด้วย

- 1.5.2.1 ความหยาบผิว (Surface Roughness)
- 1.5.2.2 การสึกหรอบนผิวหลบ (Flank Wear)

1.6 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

1.6.1 ทราบถึงปัจจัยที่มีอิทธิพลหลักต่อความหยาบผิวและการสึกหรอของเครื่องมือตัดในกระบวนการกัดวัสดุอลูมิเนียมหล่อแบบกึ่งของแข็ง A356-T6 หน่วยงานผู้ใช้ประโยชน์ ภาคเอกชน หน่วยงานต้นสังกัดผู้วิจัย และหน่วยงานอื่น ๆ ที่สนใจ

1.6.2 ทราบถึงสถานะที่เหมาะสมต่อความหยาบผิวของชิ้นงานและการสึกหรอของเครื่องมือตัดในกระบวนการกัดวัสดุอลูมิเนียมหล่อแบบกึ่งของแข็ง A356-T6 หน่วยงานผู้ใช้ประโยชน์ ภาคเอกชน หน่วยงานต้นสังกัดผู้วิจัย และหน่วยงานอื่น ๆ ที่สนใจ

1.6.3 เพื่อเพิ่มทางเลือกในอนาคตให้แก่ผู้ประกอบการในการใช้วัสดุแก่ภาคอุตสาหกรรมการผลิตชิ้นส่วนด้วยอลูมิเนียมเกรด A356-T6 ที่ต้องผ่านกระบวนการตัดเฉือนวัสดุ หันมาใช้วัสดุอลูมิเนียมหล่อแบบกึ่งของแข็งด้วยกระบวนการ GISS ซึ่งเป็นวิธีที่คิดค้นและผลิตโดยนักวิจัยไทยที่มีคุณสมบัติเชิงกลดีกว่าการผลิตแบบดั้งเดิม (Liquid Casting Process) หน่วยงานผู้ใช้ประโยชน์ ภาคเอกชน หน่วยงานต้นสังกัดผู้วิจัย และหน่วยงานอื่น ๆ ที่สนใจ

1.6.4 การเผยแพร่ในวารสารหรือสัมมนาวิชาการ อย่างน้อย 1 รายการ

1.7 นิยามคำศัพท์

- 1.7.1 ซี เอ็น ซี (CNC) ซึ่งย่อมาจาก Computer Numerical Control คือ คอมพิวเตอร์หรือไมโครโปรเซสเซอร์ สำหรับใช้ควบคุมการทำงาน
- 1.7.2 END MILL มีดกัดหรือดอกกัดเอ็นมิลล์ เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการตัดเฉือนวัสดุ
- 1.7.3 Feed per Tooth อัตราป้อนต่อฟัน (หน่วย : มิลลิเมตรต่อฟัน)
- 1.7.4 Feed Rate อัตราการป้อน (หน่วย : มิลลิเมตรต่อนาที)
- 1.7.5 Cutting Speed ความเร็วตัดเฉือน (หน่วย : เมตรต่อนาที)
- 1.7.6 SPEEDS ความเร็วรอบ (หน่วย : รอบต่อนาที)
- 1.7.7 Radial Depth of Cut ความลึกของการตัดในแนวรัศมี (หน่วย: มิลลิเมตร)
- 1.7.8 Axial Depth of Cut ความลึกของการตัดในแนวแกน (หน่วย : มิลลิเมตร)
- 1.7.9 Rake Angle มุมคายเศษ (หน่วย : องศา)
- 1.7.10 Helix Angle มุมเกลียว (หน่วย : องศา)
- 1.7.11 Number of Teeth จำนวนคมตัด (หน่วย : ฟัน)
- 1.7.12 Surface Roughness ความหยาบผิวหรือ ความเรียบผิว (หน่วย : ไมโครเมตร)
- 1.7.13 Flank Wear การสึกหรอบนผิวหลัง
- 1.7.14 VB หมายถึง ขนาดการสึกหรอบนผิวหลัง (หน่วย : ไมโครเมตร)
- 1.7.15 ชิ้นงาน หมายถึง วัสดุที่ใช้ในการทดสอบอูมิเนียมกึ่งของแข็ง A356-T6
- 1.7.16 Tool Wear หมายถึง การสึกหรอของเครื่องมือ
- 1.7.17 Cutting Tool หมายถึง เครื่องมือตัดหรือมีดกัด
- 1.7.18 Chip หมายถึง เศษวัสดุที่ถูกตัดเฉือน

บทที่ 2

ปรีทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในการวิจัยครั้งนี้มีทฤษฎีที่เกี่ยวข้องประกอบด้วย โลหะอลูมิเนียม กระบวนการหล่อโลหะ กิ่งของแข็ง ขั้นตอนการบ่มแข็ง (Age Hardening) งานกัด ความหยาบผิว (Surface Roughness) การสึกหรอในเครื่องมือกล การทดลองและการออกแบบการทดลองซึ่งสามารถอธิบายได้ดังนี้

2.1 โลหะอลูมิเนียม

อลูมิเนียม เป็นโลหะสำคัญที่ได้รับการใช้งานมากที่สุดในกลุ่มโลหะที่มีน้ำหนักเบา (Light Metals) ทั้งนี้เพราะอลูมิเนียมมีสมบัติเด่นหลายประการ (พยูร เกตุกราย, 2523) เช่น มีความหนาแน่นน้อยและมีกำลังวัสดุต่อหน่วยน้ำหนักสูงจึงนิยมใช้ทำเครื่องใช้และชิ้นส่วนบางอย่างในเครื่องบิน จรวด และชิปนาวทู สามารถขึ้นรูปด้วยกรรมวิธีต่าง ๆ ได้ง่าย จุดหลอมเหลวต่ำ หล่อหลอมง่าย และมีอัตราการไหลตัวสูง ค่าการนำไฟฟ้าไม่สูงมากนัก แต่เนื่องจากน้ำหนักเบาจึงนิยมใช้เป็นตัวนำไฟฟ้า ไม่เป็นพิษต่อร่างกายมนุษย์ มีดัชนีในการสะท้อนกลับของแสงสูงมาก ทนทานต่อการเกิดสนิมและการกัดกร่อนในบรรยากาศใช้งานทั่วไปได้ดีมาก แต่ไม่ทนต่อการกัดกร่อนต่อกรดและด่าง หาซื้อได้ง่ายและราคาไม่แพงมากนัก

อลูมิเนียมหล่อผสมตามมาตรฐานของ ASM (American Society of Metals)

ตัวเลขตัวที่หนึ่ง เป็นสัญลักษณ์แสดงกลุ่มธาตุที่ผสมธาตุหนึ่งเป็นหลัก ตามตารางที่ 2.1 เช่น 2XX.X เป็นกลุ่มธาตุผสมของอลูมิเนียม ที่มีทองแดงเป็นธาตุผสมหลัก เป็นต้น

ตัวเลขตัวที่สองและสาม เป็นสัญลักษณ์แสดงอลูมิเนียมผสม ที่มีธาตุผสมชนิดอื่นผสมเข้าไปหรือแสดงอลูมิเนียมบริสุทธิ์

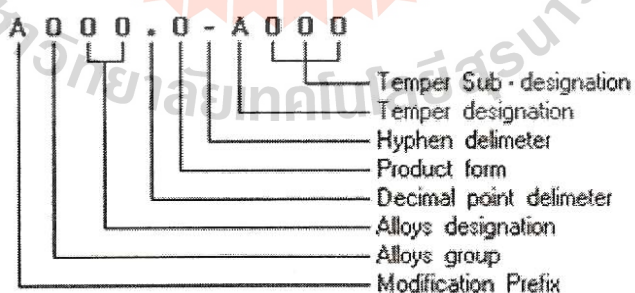
ตัวเลขตัวที่สี่ เป็นสัญลักษณ์ซึ่งเป็นการแบ่งตามการผลิตอย่างอื่น โดยจะใช้จุดทศนิยมแสดงการผลิต เป็นต้น เช่น การหล่อหรือจากแท่งอินกอต การปรับปรุงจากธาตุผสมเดิมหรือจำนวนสิ่งปนเข้าไป แสดงโดยตัวอักษรก่อนตัวเลข ตัวอักษร “X” ใหญ่ ใช้สำหรับธาตุผสมที่ทดลองอยู่ อลูมิเนียมหล่อผสมทั่วไปจะใช้ตัวเลข 3 หลัก

ตารางที่ 2.1 ตารางแสดงสัญลักษณ์กลุ่มอลูมิเนียมหล่อผสม

1XX.X	อลูมิเนียม ที่มีความบริสุทธิ์ ไม่น้อยกว่า 99.00 %
2XX.X	ทองแดง (Copper , Cu)
3XX.X	ซิลิกอน (Silicon , Si) – ทองแดง (Copper , Cu) – แมกนีเซียม (Mg) ซิลิกอน (Silicon , Si) – แมกนีเซียม (Magnesium , Mg) ซิลิกอน (Silicon , Si) – ทองแดง (Copper , Cu)
4XX.X	ซิลิกอน (Silicon , Si)
5XX.X	แมกนีเซียม (Magnesium , Mg)
7XX.X	สังกะสี (Zinc , Zn)
8XX.X	ดีบุก (Tin , Sn)
9XX.X	ธาตุอื่นๆ (Other Element)
6XX.X	ยังไม่มีใช้ (Unused Series)

(วิจิตร พงษ์บัณฑิต, 2558)

American Aluminum Association Casting Alloys ได้กำหนดมาตรฐานและแยกประเภทอลูมิเนียมหล่อผสมตาม (American National Standard Institute) ANSI Standard ได้ ดังนี้



- A : อักษรตัวแรก หมายถึง สมาชิกของ Alloys ที่เหมือนกันอยู่ในกลุ่มเดียวกัน (หมายถึง Aluminum Alloy) แม้ว่าส่วนผสมจะแตกต่างกัน
- O : Alloy group จะเป็นตัวเลขตัวเดียวจาก 1 ถึง 9 ใช้เป็นตัวกำหนด ธาตุหลักของ Alloys หรือ Major Alloying
- OO : Alloys designation เป็นตัวเลข 2 หลัก กำหนดความแตกต่างของสมาชิกในกลุ่ม Alloys เดียวกัน ความหมายของตัวเลขที่กำหนดเหมือนกับ Major Alloy ในบางครั้งตัวเลข 2 หลัก คือ ปริมาณ % ไม่น้อยกว่าของ Al ที่มีผสมอยู่ เช่น 190.X เท่ากับ Al ผสมอยู่ 99.90 %
- .O : ตัวเลขหลังจุดทศนิยม หมายถึง รูปแบบการผลิต หรือ Product form เป็นตัวเลขหลักเดียว คือ .O : เป็น Casting Specification
- .1 : เป็น Ingot Specification
- .2 : เป็น Ingot Specification ที่ควบคุมส่วนผสมน้อยกว่า .1 Ingot Specification
- A : Temper designation เป็น ตัวกำหนด แทนกรรมวิธี Temper ของกระบวนการ Heat Treatment ที่ใช้กับ Heat Treatable Alloys ดังนี้
- F : As Cast Condition หมายถึง งานจากสภาพหล่อ โดยไม่ต้องใช้ กรรมวิธีใด ๆ ควบคุม ภายหลังการหล่อขึ้นรูป
- H : Strain Hardened หมายถึง สภาพของงานแข็งตัวเอง เนื่องจาก ความเครียด จากการทำ Cold working เช่น งานรีดขึ้นรูปต่าง ๆ
- O : Anneal หมายถึง การอบอ่อน ใช้กับงานหล่อ ที่ต้องนำไปอบ เพื่อปรับปรุงขนาด รูปร่าง ให้คงที่ (Stability) ขณะใช้งาน หรือเพื่อทำให้เพิ่มความเหนียว (Ductility)
- W : Solution Heat Treat เป็นการอบเพื่อเปลี่ยนโครงสร้างให้เป็น สารละลายของแข็ง เฟสเดียวใช้กับ Alloys ที่สามารถชุบแข็งด้วยตนเองได้ในบรรยากาศปกติ
- T : เป็นการอบด้วยความร้อน โดยกำหนดกรรมวิธี Temper ที่แน่นอนดีกว่า F หรือ O การกำหนดกรรมวิธี “F”, “O” และ “T” ทุกกระบวนการ สามารถหล่อด้วย แบบทราย และแบบเหล็ก

OO : Temper Sub – designation เป็นตัวเลขระบุกรรมวิธีทำ Temper ที่ชัดเจนโดยระบุอุณหภูมิและเวลา

O : ช่วงเวลาปฏิบัติ การที่แยกละเอียดไปได้อีก 10 วิธีการจาก T1 ถึง T10 และส่วนปลีกย่อยอีกดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ตารางแสดงสัญลักษณ์การทำเทมเปอร์ (Tempering)

T1	ปล่อยให้งานเย็นตัวลงตามปกติในบรรยากาศปกติและบ่มแข็งด้วยตนเอง (Naturally Aged) โดยธรรมชาติและสภาพงานไม่เปลี่ยนแปลง
T2	ปล่อยให้งานเย็นตัวลงในบรรยากาศปกติ ความแข็งจะเกิดขึ้นจากการใช้งานที่อุณหภูมิปกติ (Cold Worked) โดยธรรมชาติ ความแข็งเพิ่มขึ้นขณะใช้งาน
T3	นำงานไปทำการอบละลาย (Solution Heat Treated) แล้วปล่อยให้งานเย็นตัวลง แล้วทำ Naturally Aged โดยทิ้งชิ้นงานไว้ในบรรยากาศจะเกิดความแข็งเอง strain hardening
T4	ทำ Solution Heat Treated และ Naturally Aged เพื่อให้ความแข็งคงตัว
T5	ปล่อยให้งานค่อย ๆ เย็นตัวลงในสภาพเดิม แล้วนำไปทำการบ่มแข็งเทียม (Artificially Aged)
T6	เป็นการทำ Solution Heat Treated , Quenching แล้วทำ Artificially Aged
T7	เป็นการทำ Solution Heat Treatment และ Stabilized
T8	เป็นการทำ Solution Heat Treated ต่อด้วย Cold Worked แล้วนำมาทำ Artificially Aged
T9	เป็นการทำ Solution Heat Treated ต่อด้วย Artificially Aged แล้วนำมาทำ Cold Worked
T10	เป็นการให้งานเย็นตัวตามปกติ แล้วนำไปขึ้นรูป Cold Worked แล้วนำมาทำ Artificially Aged

(วิจิตร พงษ์บัณฑิต, 2558)

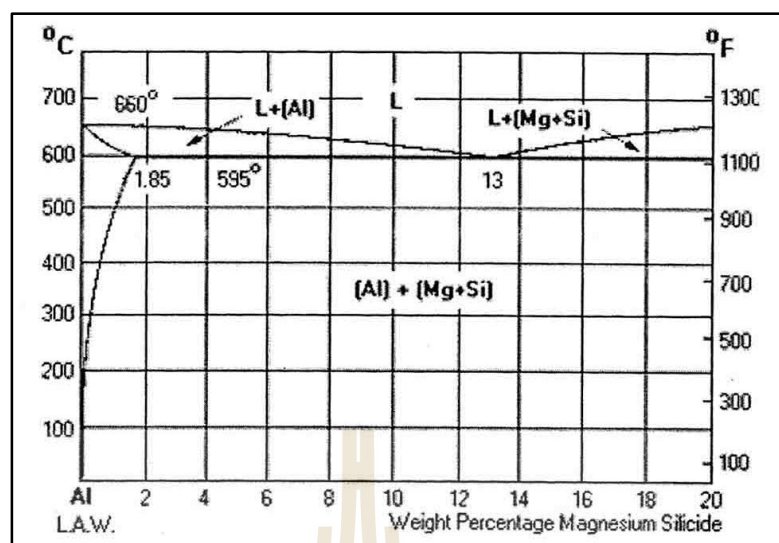
2.1.1 โลหะผสมหล่ออลูมิเนียม (3XX.XX)

โลหะผสมอลูมิเนียม – ซิลิกอนเป็นโลหะผสมที่มีความสามารถในการไหลดี ทำให้งานหล่อเป็นรูปพรรณได้ง่าย และมีสมบัติด้านการกัดกร่อนที่ดีเหมาะสำหรับใช้ในงานเชื่อม แต่ไม่เหมาะสมกับงานกลึง

จากแผนภูมิสมดุลภาคของอลูมิเนียม – ซิลิกอนในรูปที่ 2.1 โดยจะมีลักษณะเด่นชัดที่ซิลิกอนแยกตัวไม่ละลายในอลูมิเนียม โดยเกิดปฏิกิริยายูเทคติกที่อุณหภูมิ 577°C และมีส่วนผสมของซิลิกอน 11.6 % การแยกตัวให้ปฏิกิริยายูเทคติกจากโลหะหลอมเหลว 11.6 % ซิลิกอน จะให้เฟส α ที่มี 1.65 % ซิลิกอน เฟส Si มีสมบัติที่แข็งและเปราะ ถ้าในโครงสร้างมีการตกผลึกของ เฟส Si ขนาดใหญ่จะมีลักษณะต่อเนื่อง มีผลทำให้โลหะผสมมีความแข็งแรงต่ำและขาดสมบัติด้านความเหนียว การปรับปรุงสมบัติทางกลของโลหะผสมสามารถกระทำได้หลายวิธี เช่น เพิ่มอัตราการเย็นตัวภายในแบบหล่อให้สูงขึ้น เพิ่มปริมาณนิวเคลียสของการแข็งตัวเพื่อลดขนาดเกรนให้เล็กลงหรือใช้เทคนิคโมดิฟิเคชัน (Modification)

2.1.2 อลูมิเนียมหล่อหมายเลข A356

อลูมิเนียมหล่อผสมหมายเลข A356 เป็นโลหะผสม อลูมิเนียม – ซิลิกอนแบบไฮโปยูเทคติกสามารถหล่อได้ดีทั้งในแบบทรายและแบบโลหะ มีความสามารถในการไหลตัวได้ดีและการหดตัวน้อยมาก มีความแตกต่างจากอลูมิเนียมหล่อหมายเลข 356 ตรงที่มีปริมาณเหล็กที่ลดลงซึ่งมีผลทำให้สมบัติการต้านแรงดึงสูงขึ้นและความอ่อนเหนียวมากขึ้น การยืดตัวสูง ทนต่อแรงกระแทกได้สูง ส่วนผสมทางเคมีของอลูมิเนียมผสมหมายเลข A356 เป็น Al, 7 % Si, 0.35 % Mg, 0.20 % Fe, 0.20 % Cu, 0.10 % Mn, 0.10 % Zn และ 0.230 % Ti การเติมแมกนีเซียมลงไปเล็กน้อยทำให้สามารถปรับปรุงสมบัติทางกลได้ด้วยกรรมวิธีทางความร้อน โดยการฟอร์มเฟส Mg_2Si ในเมตริกซ์ของอลูมิเนียม กระบวนการทางความร้อนที่ใช้เพื่อปรับปรุงสมบัติทางกลมีอยู่หลายวิธี แต่ที่นิยมใช้มากที่สุด ได้แก่ ชนิด T6 คือ การนำชิ้นงานไปอบละลายแล้วนำไปชุบน้ำ จากนั้นจึงนำไปทำการบ่มแข็งเทียม



รูปที่ 2.1 แผนภาพสมดุลภาคโลหะผสมอลูมิเนียม – ซิลิกอน – แมกนีเซียม
(จิตร พงษ์บัณฑิต, 2558)

โลหะผสมอลูมิเนียม – ซิลิกอน ไม่สามารถเพิ่มความแข็งแรงให้สูงขึ้นได้ ด้วยวิธีการอบชุบความร้อน แต่เมื่อเติมแมกนีเซียมหรือทองแดง จะเกิดการรวมตัวให้เฟสกับโลหะ เช่น Mg_2Al_3 หรือ $CuAl_2$ ซึ่งทำให้สามารถปรับปรุงสมบัติทางกลได้โดยนำมาผ่านกระบวนการทางความร้อนแบบ T5 ที่ประกอบด้วยกระบวนการบ่มแข็งเทียมหรือ T6 ที่ประกอบด้วย 3 กระบวนการ ดังนี้

1. การอบละลาย (Solution treatment) เป็นการอบเพื่อละลายเฟสที่สอง เช่น Mg_2Si หรือ $CuAl_2$ ให้อยู่ในรูปสารละลายของแข็งและมีการแพร่อย่างทั่วถึงทั้งชิ้นงาน โดยอุณหภูมิและเวลาของการอบละลายขึ้นอยู่กับหมายเลขและขนาดของโลหะผสมเป็นหลัก

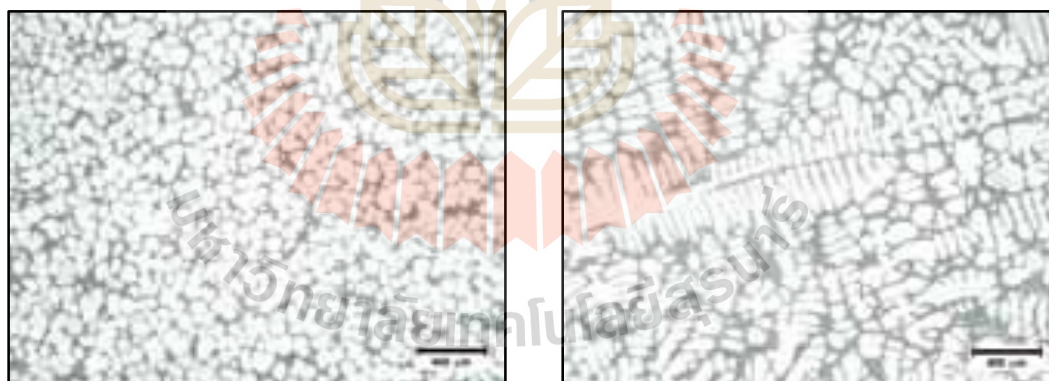
2. การชุบเย็น (Quenching) เพื่อให้ธาตุ Mg และ Cu ที่ละลายเป็นสารละลายของแข็งในกระบวนการแรก ยังคงอยู่ในสถานะสารละลายของแข็งที่อุณหภูมิต่ำ โดยนำโลหะผสมจากกระบวนการที่ 1 มาทำให้เกิดการเย็นตัวลงอย่างรวดเร็ว ธาตุเหล่านี้จะอยู่ในรูปสารละลายของแข็งที่มีสถานะอิ่มตัวยังขาดและพร้อมที่จะตกตะกอนออกมาเมื่อนำมาผ่านกระบวนการขั้นที่ 3

3. การบ่มแข็ง (Aging) เป็นกระบวนการที่ทำให้เกิดการตกตะกอนของเฟสกับโลหะที่มีความละเอียดมาก และช่วยเพิ่มความแข็งแรงได้ การบ่มแข็งอาจทำได้ โดยการวางชิ้นงานไว้ในอุณหภูมิห้องเรียกว่า การบ่มแข็งธรรมชาติ (Natural aging) หรือนำชิ้นงานไปอบที่อุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการตกตะกอน เรียกว่า การบ่มแข็งเทียม (Artificial aging) โดยอุณหภูมิของการ

บ่มแข็งที่ขึ้นอยู่กับหมายเลขของโลหะผสม และเวลาของการบ่มแข็งที่ให้ความแข็งสูงสุดขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของการบ่มแข็ง

2.2 กระบวนการหล่อโลหะกึ่งของแข็ง

กระบวนการหล่อโลหะกึ่งของแข็ง ถูกค้นพบมากกว่า 30 ปีแล้ว ที่สถาบันเทคโนโลยีแห่งรัฐแมสซาชูเซตส์ (MIT) ซึ่งกระบวนการขึ้นรูปทำได้ด้วยการหล่อโลหะกึ่งของแข็งที่มีโครงสร้างแบบก้อนกลม (ดังรูปที่ 2.2 ซ้าย) ลงในแม่พิมพ์แทนการหล่อด้วยน้ำโลหะ (โครงสร้างเมื่อแข็งตัวแสดงในรูปที่ 2.2 ขวา) สมบัติของโลหะกึ่งของแข็งมีหลายประการ เช่น มีอุณหภูมิที่ต่ำกว่าโลหะเหลว โลหะเริ่มแข็งตัวบางส่วนแล้วขณะเทใส่แม่พิมพ์ มีความหนืดที่สูงกว่าน้ำโลหะ มีความเย็นช้ากว่าโลหะที่แข็งตัวแล้ว ทำให้ไม่ต้องใช้แรงในการขึ้นรูปมาก ดังแสดงได้จากการตัดแท่งอะลูมิเนียมด้วยมือได้ในสถานะที่เป็นโลหะกึ่งของแข็ง (ดังรูปที่ 2.3) ซึ่งสมบัติดังกล่าวมีข้อดีหลายประการที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้อย่างหลากหลายในกระบวนการผลิต เช่น ลดการเกิดของเสียจากปฏิกิริยาระหว่างออกซิเจนในขั้นตอนการหล่อโลหะลงในเบ้าและลดการเกิดโพรงหดตัว อีกทั้งยังช่วยยืดอายุการใช้งานของแม่พิมพ์ด้วย



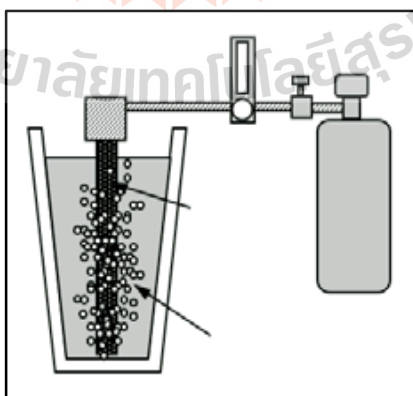
รูปที่ 2.2 โครงสร้างจุลภาคของโลหะกึ่งของแข็ง (ซ้าย) เปรียบเทียบกับการหล่อทั่วไป (ขวา)

(เจษฎา วรรณสินธุ์, 2552)



รูปที่ 2.3 สมบัติของแท่งอะลูมิเนียมกึ่งของแข็งที่ตัดด้วยมือ โดยใช้แรงเพียงเล็กน้อยก็ขึ้นรูปได้
(เจษฎา วรรณสินธุ์, 2552)

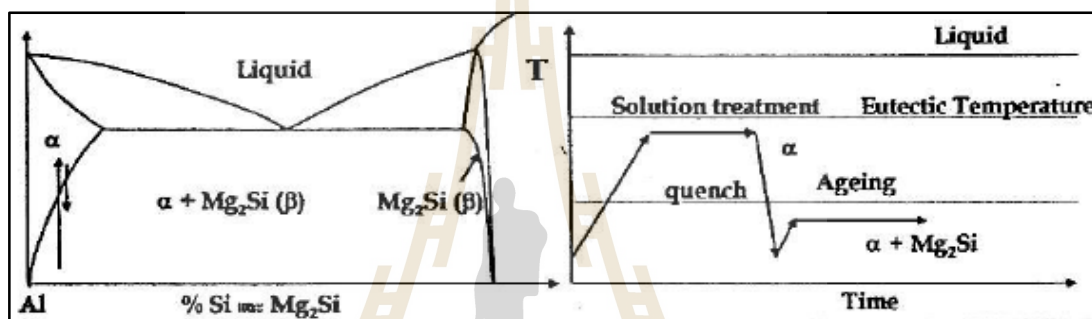
จากปัญหาดังกล่าว ทีมวิจัย Innovative Metal Technology หรือ IMT ได้คิดค้นกระบวนการใหม่ มีชื่อเรียกว่า กระบวนการ Gas Induced Semi-Solid หรือ GISS ที่ใช้เทคนิคใหม่ในการผลิตโลหะกึ่งของแข็ง โดยการปล่อยฟองแก๊สที่ละเอียดมาก ผ่านแท่งกราฟไฟต์พูนในน้ำโลหะขณะที่มีการแข็งตัวบางส่วน (ดูรูปที่ 2.4) ทำให้กระบวนการใหม่นี้ สามารถใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพควบคุมตัวแปรต่าง ๆ ได้ง่ายและผลิตโลหะกึ่งของแข็งที่มีคุณภาพสูงได้ดี ทั้งนี้ได้มีการพัฒนาเครื่องต้นแบบของกรรมวิธี GISS ที่สามารถผลิตโลหะกึ่งของแข็งได้อย่างมีประสิทธิภาพในราคาที่ถูกลงกว่าเครื่องจักรที่นำเข้าจากต่างประเทศหลายสิบเท่า



รูปที่ 2.4 กรรมวิธีการผลิตโลหะกึ่งของแข็งโดยวิธี Gas Induced Semi - Solid (GISS)
(เจษฎา วรรณสินธุ์, 2552)

2.3 ขั้นตอนการบ่มแข็ง (Age Hardening)

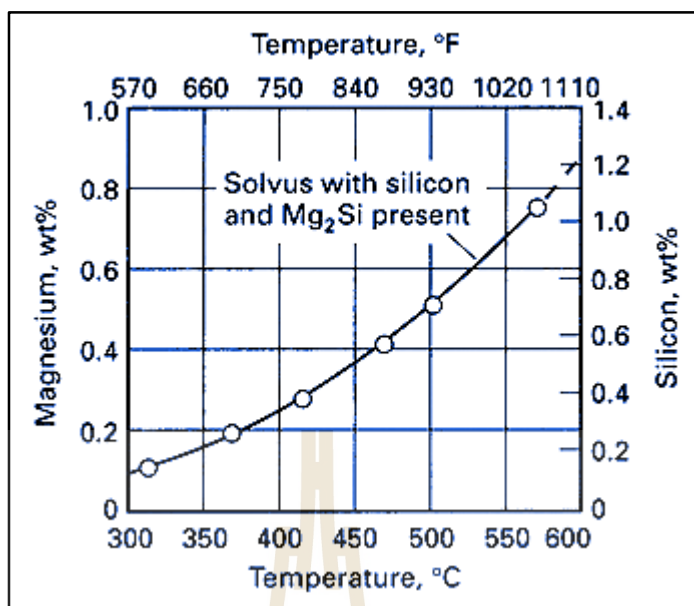
โลหะผสมอลูมิเนียม - ซิลิกอนชนิดเกรด A356 ถูกนำมาเพิ่มความแข็งแรงจากสภาวะหล่อด้วยกระบวนการบ่มแข็ง (Age Hardening) โดยทำให้เกิดอนุภาคนาขนาดเล็กของเฟสที่สอง (Secondary Phase) นั่นคือ อนุภาค Mg_2Si กระจายตัวอยู่ในเนื้อเมตริกซ์ (เฟส $\alpha - Al$) โดยอนุภาค Mg_2Si ที่เกิดขึ้นเหล่านี้ทำหน้าที่ต้านทานการเคลื่อนที่ของดิสโลเคชัน (Dislocation) ด้วยกลไก Cutting และ Bowing ส่งผลให้ชิ้นงานที่ผ่านการบ่มแข็งมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น ซึ่งขั้นตอนการบ่มแข็งประกอบด้วยกระบวนการอบชุบ 3 ขั้นตอนดังแสดงในรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 ขั้นตอนการบ่มแข็งของโลหะผสมอลูมิเนียม - ซิลิกอนเกรด A356

2.3.1 ขั้นตอน Solution Treatment

โลหะอลูมิเนียมหล่อผสมเกรด A356 จะมีส่วนผสมทางเคมีที่สำคัญ คือ อลูมิเนียม, ซิลิกอน และแมกนีเซียม ซึ่งผลจากอัตราการเย็นตัวขึ้นทดสอบในสภาวะหล่อจะเกิดการ Segregation ของแมกนีเซียมและซิลิกอนอยู่ในรูปของเฟส Mg_2Si ที่มีขนาดใหญ่และซิลิกอนที่เหลือจะอยู่ใน รูปเฟส Eutectic Silicon เมื่อขึ้นทดสอบผ่านการทำ Solution Heat Treatment ด้วยการอบขึ้นทดสอบที่อุณหภูมิสูงพบว่าการละลายของเฟส Mg_2Si ทำให้ซิลิกอนและแมกนีเซียมละลายเข้าสู่ในโครงสร้างอลูมิเนียม



รูปที่ 2.6 ความสามารถในการละลายของธาตุซิลิคอนและแมกนีเซียม
ภายในเนื้อเมตริกซ์กับอุณหภูมิ

(Cerri E., et.al., 2558)

เมื่อพิจารณาโครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมอลูมิเนียม-ซิลิคอนหล่อเกรด A356 จากเฟสไดอะแกรมของอลูมิเนียม-ซิลิคอน-แมกนีเซียมซิลิไซด์พบว่า อุณหภูมิในการแข็งตัวของเฟสแต่ละชนิดมีค่าแตกต่างกัน ส่งผลให้เกิดการแยกตัวของธาตุต่าง ๆ ภายในโครงสร้างของชิ้นงาน ซึ่งเรียกว่าการเกิด Segregation จากเฟสไดอะแกรมพบว่าเมื่อน้ำอลูมิเนียมหลอมไหลผ่านอุณหภูมิ 615 °C จะเริ่มเกิดเฟสของแข็ง ซึ่งเรียกว่าเฟส α -Al ซึ่งจะเริ่มแข็งตัวก่อนและมีลักษณะรูปร่างคล้ายกิ่งไม้ ที่เรียกว่า Dendrite โดยเฟส α -Al ที่เกิดขึ้นมีปริมาณซิลิคอนและแมกนีเซียมที่สามารถละลายได้น้อยมาก เมื่อเฟส α -Al เติบโตขึ้นเรื่อย ๆ ทำให้น้ำอลูมิเนียมหลอมเหลวมีปริมาณของธาตุซิลิคอนและแมกนีเซียมเพิ่มขึ้น ซึ่งอยู่ตามระหว่างแขน Dendrite ทำให้ชิ้นทดสอบจะอยู่ในสภาวะกึ่งของแข็งกึ่งของเหลว จนกระทั่งเมื่อชิ้นทดสอบเย็นตัวผ่านอุณหภูมิ 577 °C จะมีเฟส Eutectic Silicon เกิดขึ้นและเป็นบริเวณที่เย็นตัวสุดท้าย ส่งผลทำให้เกิดความแตกต่างของส่วนผสมทางเคมีภายในโครงสร้างของชิ้นงาน

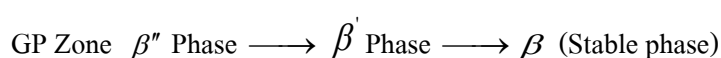
โดยขั้นตอน Solution Treatment คือ ขั้นตอนการอบขึ้นทดสอบที่อุณหภูมิสูง ทำให้อะตอมของธาตุต่าง ๆ ภายในโครงสร้างผลึกเกิดการแพร่ของอะตอมจากบริเวณที่มีความเข้มข้นสูงไปยังบริเวณที่มีความเข้มข้นต่ำได้รวดเร็วขึ้น โดยการให้ความร้อนกับโลหะผสมอลูมิเนียม - ซิลิกอนหล่อเกรด A356 จนกระทั่งอุณหภูมิของชิ้นงานเท่ากับ $520 - 550\text{ }^{\circ}\text{C}$ เป็นระยะเวลา 4 - 12 ชั่วโมง ทำให้อะตอมของตัวถูกละลายเกิดการละลาย อาทิ เช่น ซิลิกอน แมกนีเซียมละลายเข้าสู่ตัวทำละลายคือเฟส $\alpha - \text{Al}$ เพื่อทำให้เนื้อเมตริกซ์มีความเป็นเนื้อเดียวกับตัวทำละลาย โดยอาศัยการแพร่ของอะตอมในโครงสร้างซึ่งเป็นการแพร่แบบแทนที่ จากเฟสไดอะแกรมพบว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิของชิ้นงานให้สูงขึ้น ส่งผลให้อะตอมต่าง ๆ ภายในโครงสร้างมีพลังงานเพิ่มขึ้น ซึ่งทำให้เกิดโอกาสในการเกิดช่องว่างภายในโครงสร้างของผลึกซึ่งเรียกว่า วาเคนซี (Vacancy) ได้มากขึ้น โดยวาเคนซีที่เกิดขึ้นเหล่านี้ทำให้อะตอมของซิลิกอนและแมกนีเซียมสามารถแพร่แบบแทนที่เข้าสู่เนื้อเมตริกซ์ได้รวดเร็วขึ้น

2.3.2 ขั้นตอน Quenching

โดยการชุบขึ้นทดสอบที่ผ่านขั้นตอน Solution Treatment ในน้ำที่มีอุณหภูมิในช่วง $25 - 60\text{ }^{\circ}\text{C}$ ทำให้อะตอมของซิลิกอนและแมกนีเซียมที่ละลายเข้าสู่เฟส $\alpha - \text{Al}$ ในระหว่างขั้นตอน Solution Treatment ไม่มีระยะเวลาเพียงพอที่จะแพร่ออกจากเฟส $\alpha - \text{Al}$ จึงตกค้างภายในเนื้อเมตริกซ์ $\alpha - \text{Al}$ ในสภาวะสารละลายของแข็งอิ่มตัวยิ่งยวด (Super saturated solid-solution)

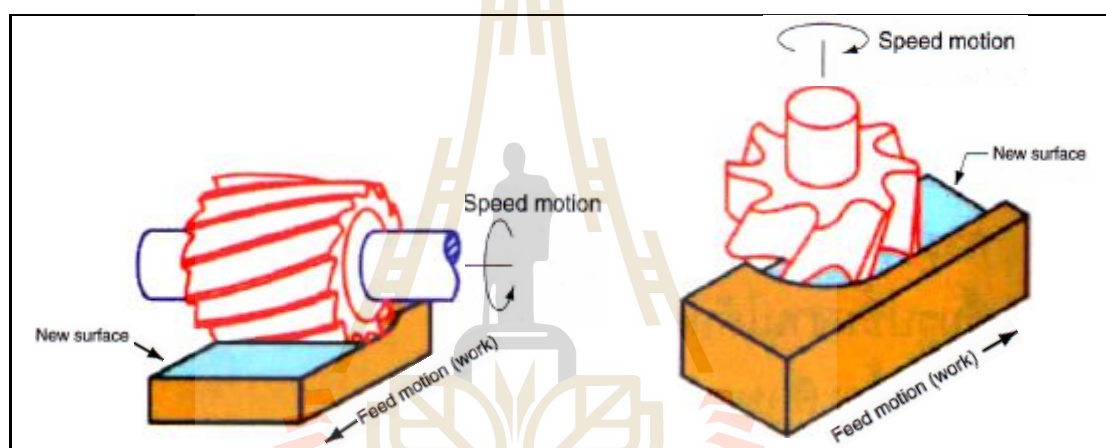
2.3.3 ขั้นตอน Aging

โดยการให้ความร้อนแก่ชิ้นทดสอบที่อุณหภูมิประมาณ $120 - 200\text{ }^{\circ}\text{C}$ เป็นระยะเวลา 3 - 24 ชั่วโมง หลังจากผ่านขั้นตอน Quenching ในขั้นตอน Aging จะเกิดการแพร่ของอะตอมซิลิกอนและแมกนีเซียมออกจากเฟส $\alpha - \text{Al}$ ไปรวมตัวกันและเกิดเป็นกลุ่มอนุภาคของเฟสใหม่ที่เรียกว่าอนุภาค Mg_2Si และอนุภาคที่เกิดขึ้นเหล่านี้มีขนาดเล็กในระดับนาโนเมตรและกระจายตัวในเนื้อเมตริกซ์ โดยอุณหภูมิและระยะเวลาในขั้นตอน Aging มีผลต่ออัตราการแพร่ของอะตอมของซิลิกอนและแมกนีเซียมที่จะฟอร์มตัวกันเป็นอนุภาค Mg_2Si โดยกลไกการเกิดเฟสใหม่เป็นไปตามปฏิกิริยา Precipitation Hardening ดังนี้



2.4 งานกัด

การกัด (Milling) คือ การตัดเนื้อวัสดุที่เครื่องมือตัดหมุนรอบตัวเองอยู่กับที่ จากนั้นเลื่อนโต๊ะงานที่ใช้จับชิ้นงานให้เคลื่อนที่เข้าไปหาเครื่องมือตัดเพื่อให้เครื่องมือตัดที่กำลังหมุนอยู่นั้นตัดเนื้อวัสดุตามรูปร่างที่ต้องการ โดยเครื่องมือตัดจะหมุนและเคลื่อนที่ช้า ๆ สัมพันธ์กับการเคลื่อนที่ของชิ้นงาน ทำให้เกิดระนาบของผิวงานใหม่ ทิศทางการป้อน (Feed direction) ของชิ้นงานจะตั้งฉากกับแกนการหมุนของเครื่องมือตัด ในขณะที่การหมุนของเครื่องมือตัดถูกกำหนดด้วยความเร็ว (Speed) การกัดขึ้นรูปมีหลายประเภท แต่จำแนกการกัดเป็น 2 ชนิดใหญ่ คือ งานกัดในแนวนอน (Peripheral Milling) และงานกัดในแนวตั้ง (Face Milling) ดังรูปที่ 2.7



งานกัดในแนวนอน (Peripheral Milling)

งานกัดในแนวตั้ง (Face Milling)

รูปที่ 2.7 ลักษณะของการกัด

(อำนาจ ทองแสน, 2559)

ขั้นตอนหลักในกระบวนการกัดเกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนรูปโดยการเฉือน (Shear deformation) ทำให้เกิดเศษตัด (Chip) เมื่อเศษตัดถูกกัดออกจากชิ้นงานจะเกิดผิวชิ้นงานใหม่ กระบวนการกัดนี้ใช้ในการผลิตชิ้นงานให้ตามรูปร่างที่ต้องการและถือว่าเป็นกระบวนการผลิตที่สำคัญมากอย่างหนึ่ง

เหตุผลที่กระบวนการกัดมีความสำคัญมากในเชิงพาณิชย์และเชิงเทคโนโลยีสามารถสรุปได้ดังนี้

- สามารถประยุกต์ใช้ได้อย่างกว้างขวางกับวัสดุหลายประเภท โดยส่วนใหญ่ใช้ได้กับโลหะแข็งรวมถึง พลาสติกและพลาสติกผสม
- สามารถใช้ในการทำชิ้นงานที่มีรูปร่างหลากหลาย รวมถึงชิ้นงานที่มีรูปร่างซับซ้อน โดยการใช้วิธีการกัดหลาย ๆ แบบและหลาย ๆ ขั้นตอนตามรายละเอียดชิ้นงาน
- สามารถผลิตชิ้นงานที่มีขนาดความคลาดเคลื่อนหรือพิถีความเพื่อ (Tolerance) น้อยกว่า 0.001 นิ้ว (0.025 มิลลิเมตร) ซึ่งมีความถูกต้องมากกว่ากระบวนการผลิตส่วนใหญ่
- มีความสามารถผลิตผิวสำเร็จ (Surface finish) ของชิ้นงานให้มีความเรียบ 16 μm (0.4 μm) หรือดีกว่า

ด้วยคุณสมบัติเบื้องต้น กระบวนการกัดจึงมักนิยมใช้กับชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการผลิตแบบอื่น ๆ มาแล้ว เช่น งานหล่อ (Casting) หรือการขึ้นรูปขนาดใหญ่ ตัวอย่างเช่น การตีขึ้นรูป (Forging) โดยรูปร่างทั่วไปของชิ้นงานจะถูกผลิตโดยกระบวนการอื่นและใช้กระบวนการกัดในการผลิตชิ้นงานสำเร็จให้มีขนาดรูปร่างที่ถูกต้องและมีผิวงานตามที่ต้องการ

2.4.1 อิทธิพลที่มีผลต่อการตัดเฉือน

ผู้ปฏิบัติงานจะต้องมีความรู้ในทฤษฎีของการตัดเฉือน พิจารณา ก. ความเร็วตัด (Cutting Speed), ข. ความเร็วรอบ (Speed), ค. อัตราป้อน (Feed Rate) และ ง. ความลึกของการตัด (Depth of Cut) ซึ่งจะต้องสัมพันธ์กับเครื่องจักรด้วยและข้อมูลต่าง ๆ เช่น ข้อมูลทางด้านเทคนิคของวัสดุชิ้นงาน ข้อมูลทางด้านเทคนิคของวัสดุเครื่องมือตัด เป็นต้น ข้อมูลเหล่านี้จะมีผลต่อคุณภาพผิวของชิ้นงาน เพราะจะต้องนำค่าต่าง ๆ มาคำนวณ เพื่อจะนำไปป้อนค่าต่าง ๆ ลงในโปรแกรม CNC เพื่อที่จะนำข้อมูลไปป้อนลงในเครื่องกัด ต่อไป

ก. ความเร็วตัด (Cutting Speed)

ความเร็วตัด คือ ความเร็วตามแนวเส้นรอบวงของเครื่องมือตัดที่สามารถตัดเฉือนวัสดุชิ้นงานออกได้เป็นระยะทางภายในหนึ่งหน่วยเวลา การเลือกค่าความเร็วตัดนั้นต้องพิจารณาปัจจัยที่สำคัญ ได้แก่ ข้อมูลทางด้านเทคนิคของวัสดุชิ้นงาน ข้อมูลทางด้านเทคนิคของวัสดุเครื่องมือตัด อัตราป้อน ความลึกของการตัด คุณภาพหรือความหยาบผิวงานที่ต้องการ และประสิทธิภาพของเครื่องกัด เป็นต้น โดยความเร็วตัดจะสามารถคำนวณได้จากสูตรที่ (2.1)

$$V_c = \frac{\pi \times D \times N}{1,000} \quad (2.1)$$

เมื่อ

V_c	คือ	ความเร็วตัด (เมตร/นาที)
π	คือ	ค่าพาย เป็นค่าคงที่ มีค่าเท่ากับ 3.14
D	คือ	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของดอกสว่านหรือดอกเจาะ (มิลลิเมตร)
N	คือ	ความเร็วรอบ (รอบ/นาที)

สำหรับค่าความเร็วตัดของวัสดุแต่ละชนิดนั้น สามารถดูได้จากตารางที่ 2.3 หรือคู่มือในการตัดเฉือนของวัสดุนั้น ๆ ซึ่งในทางปฏิบัติมักจะนำค่าความเร็วตัดจากตารางไปคำนวณหาความเร็วรอบของเครื่องมือตัดอีกครั้งหนึ่ง

ตารางที่ 2.3 ค่าความเร็วตัดของวัสดุชนิดต่าง ๆ

ชนิดของวัสดุ	ความเร็วตัด	
	เครื่องมือตัดเหล็กกล้าความเร็วสูง (High Speed Steel Cutting Tool)	เครื่องมือตัดคาร์ไบด์ (Carbide Cutting Tool)
เหล็กกล้าใช้งานทั่วไป	21 - 30	45 - 75
เหล็กกล้าเครื่องมือ	18 - 20	40 - 60
เหล็กหล่อ	15 - 25	40 - 60
โลหะผสมทองแดงและคืบูก	20 - 35	60 - 120
อลูมิเนียม	150 - 300	300 - 600

(อำนาจ ทองแสน, 2559)

ข. ความเร็วรอบ (Speed)

ความเร็วรอบ คือ จำนวนรอบหรือความเร็วรอบของเครื่องมือตัดที่หมุนไปได้ภายในหนึ่งหน่วยเวลา (นาที) โดยความเร็วรอบของเครื่องมือตัดจะขึ้นอยู่กับค่าความเร็วตัดของและขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของเครื่องมือตัดเป็นหลัก โดยความเร็วรอบจะสามารถคำนวณได้จากสูตรที่ (2.2)

$$N = \frac{V_c \times 1,000}{\pi \times D} \quad (2.2)$$

เมื่อ		
N	คือ	ความเร็วรอบ (รอบ/นาที)
V_c	คือ	ความเร็วตัด (เมตร/นาที)
π	คือ	ค่าพาย เป็นค่าคงที่มีค่าเท่ากับ 3.14
D	คือ	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของดอกสว่านหรือดอกเจาะ (มิลลิเมตร)

ค. อัตราป้อน (Feed Rate)

อัตราป้อน คือ ระยะที่คมตัดของเครื่องมือตัดที่เคลื่อนที่เข้าตัดเนื้อชิ้นงานภายในหนึ่งหน่วยเวลา (นาที) อัตราป้อนเป็นตัวแปรที่สำคัญในการกำหนดคุณภาพหรือความหยาบผิวงาน และระยะเวลาในการตัดเนื้ออีกด้วย โดยอัตราป้อนจะสามารถคำนวณได้จากสูตรที่ (2.3)

$$V_f = f_z \times Z \times N \quad (2.3)$$

เมื่อ		
V_f	คือ	อัตราป้อน (มิลลิเมตร/นาที)
f_z	คือ	อัตราป้อนต่อฟัน (มิลลิเมตร/ฟัน)
Z	คือ	จำนวนฟันของเครื่องมือตัด
N	คือ	ความเร็วรอบ (รอบ/นาที)

การเลือกใช้อัตราป้อนในงานกัด ต้องพิจารณาจากปัจจัยที่สำคัญ เช่น ข้อมูลทางด้านเทคนิคของวัสดุชิ้นงาน ข้อมูลทางด้านเทคนิคของวัสดุเครื่องมือตัด อัตราป้อน ความลึกและความกว้างของการตัด รูปร่างของเครื่องมือตัด ความแข็งแรง ความเที่ยงตรง ความหยาบผิวงานที่ต้องการ ประสิทธิภาพของเครื่องกัด การจับยึดชิ้นงาน และการติดตั้งเครื่องมือตัด เป็นต้น

สำหรับค่าอัตราป้อนสามารถหาค่าได้จากคู่มือมาตรฐาน ซึ่งค่าอัตราป้อนจะขึ้นอยู่กับข้อมูลทางด้านเทคนิคของวัสดุชิ้นงานและข้อมูลทางด้านเทคนิคของวัสดุเครื่องมือตัด ดังตัวอย่างในตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 ค่าอัตราป้อนสามารถดูได้จากคู่มือมาตรฐาน

ชนิดของวัสดุ	ชนิดของเครื่องมือตัด					
	Face Mill	Helical Mill	Slotting and Side Mill	End Mill	Form Mill	Circular Saw
เหล็กกล้าใช้งานทั่วไป	0.30	0.25	0.18	0.15	0.10	0.08
เหล็กกล้าเครื่องมือ	0.25	0.02	0.15	0.13	0.08	0.08
เหล็กหล่อ	0.33	0.25	0.18	0.18	0.10	0.08
ทองเหลืองหรือโลหะผสมทองแดงและดีบุก	0.35	0.28	0.20	0.18	0.10	0.08
อลูมิเนียม	0.55	0.45	0.33	0.28	0.18	0.13
สแตนเลส	0.15	0.13	0.10	0.08	0.05	0.05

(อำนาจ ทองแสน, 2559)

ง. ความลึกของการตัด (Depth of Cut)

ความลึกของการตัดที่เหมาะสมนั้น ต้องคำนึงถึงคุณภาพหรือความหยาบผิวที่ต้องการ ถ้าเพิ่มความลึกของการตัด เวลาในการผลิตชิ้นงานนั้นจะน้อยกว่า แต่ความหยาบผิวของชิ้นงานจะมีค่ามากเกินไปที่จะยอมรับได้ แต่ถ้าเราใช้ความลึกของการตัดน้อย ๆ ความหยาบผิวของชิ้นงานจะมีค่าที่ดีขึ้น แต่เวลาในการผลิตชิ้นงานนั้นจะยาวนานขึ้นและมีผลต่อการสึกหรอของเครื่องมือตัดอีกด้วย โดยทางปฏิบัติจะทำการกัดแบบหยาบก่อน แล้วทำการกัดละเอียด เพื่อให้ได้ความหยาบผิวของชิ้นงานที่ดี

2.4.2 เครื่องกัดซีเอ็นซี

เครื่องกัดซีเอ็นซี แตกต่างกับเครื่องแมชชีนนิ่งเซ็นเตอร์ (CNC Machining Center) ตรงที่ เครื่องแมชชีนนิ่งเซ็นเตอร์ มีอุปกรณ์เปลี่ยน Tool อัตโนมัติ ATC (Automatic Tool Changer) ส่วนเครื่องกัด CNC ไม่มี

ประเภทของเครื่องกัด CNC สามารถแบ่งออกได้ตามการติดตั้ง Spindle ได้ 2 แบบ ประกอบไปด้วย

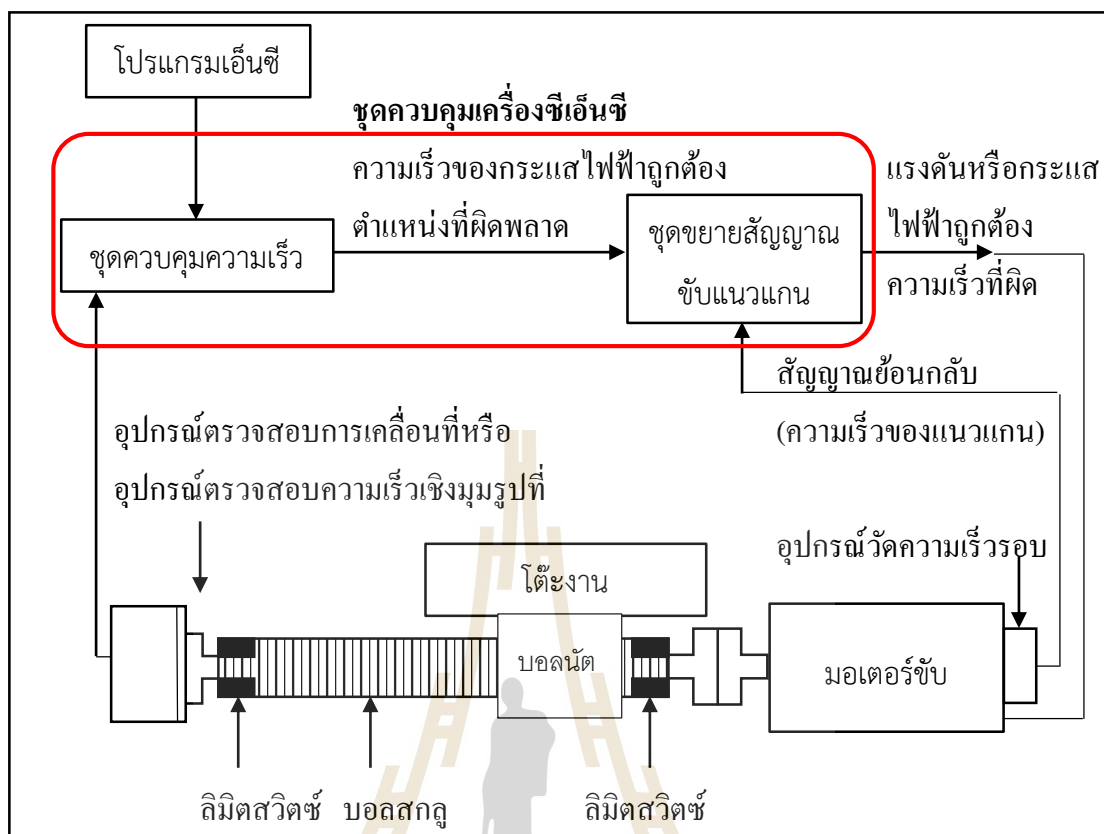
1. Spindle แนวตั้ง (Vertical Machining Center : VMC) ส่วนใหญ่ Spindle จะเคลื่อนที่ขึ้น - ลงตามแนวแกน Z

2. Spindle แนวนอน (Horizontal Machining Center : HMC) ส่วนใหญ่ Spindle จะเคลื่อนที่เข้า-ออกตามแนวแกน Z และเคลื่อนที่ขึ้น-ลงตามแนวแกน Y

ส่วนประกอบต่างๆ ของเครื่องกัด CNC ประกอบไปด้วย เช่น แท่นเครื่อง (Machine Bed), โต๊ะงาน (Table), Spindle, ชุดควบคุม (Control Unit), อุปกรณ์สำหรับจับเคลื่อน (Chip Conveyor), ชุดเปลี่ยนโต๊ะชิ้นงาน (Pallet Changer) และชุดโต๊ะงานหมุน (CNC Rotary Table)

2.4.2.1. หลักการทำงานของเครื่องจักรกลซีเอ็นซี

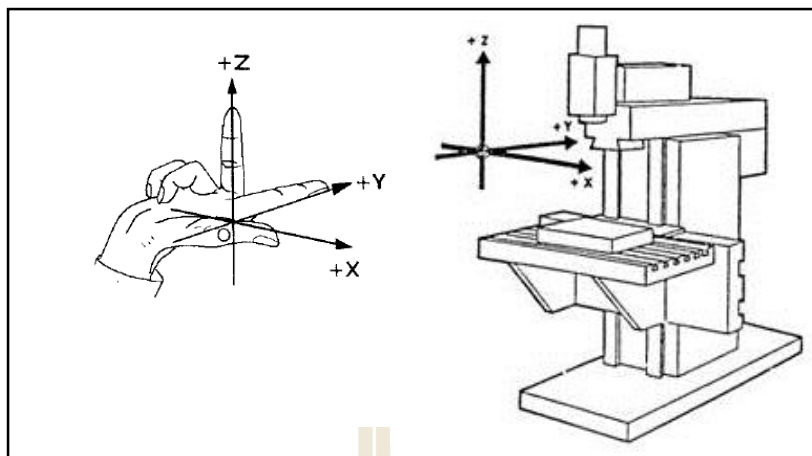
เครื่องจักรกลซีเอ็นซีจะทำงานได้นั้น ระบบควบคุมของเครื่องจะต้องได้รับคำสั่งเป็นภาษาที่ระบบควบคุมเข้าใจได้เสียก่อนว่าจะให้เครื่องจักรกลซีเอ็นซีทำอะไร ดังนั้นจึงจำเป็นต้องป้อนโปรแกรมคอมพิวเตอร์หรือโปรแกรมเอ็นซี (NC Program) เข้าไปในระบบควบคุมของเครื่องผ่านแป้นพิมพ์ (Key Board) หรือเทปแม่เหล็ก (Magnetic Tape) เมื่อระบบควบคุมอ่านโปรแกรมที่ป้อนเข้าไปแล้ว ก็จะนำไปควบคุมให้เครื่องจักรกลทำงาน โดยอาศัยมอเตอร์ป้อน (Feed Moter) เพื่อให้แท่นเลื่อนเคลื่อนที่ได้ เครื่องกัดซีเอ็นซีจะมีมอเตอร์ในการเคลื่อนที่ 3 ตัว แนวแกน X, Y และ Z เมื่อระบบควบคุมอ่านโปรแกรมแล้วก็จะเปลี่ยนรหัสของโปรแกรมไปเป็นสัญญาณทางไฟฟ้า เพื่อควบคุมให้มอเตอร์ทำงาน แต่เนื่องจากสัญญาณที่ออกจากระบบควบคุมนี้มีกำลังน้อย ไม่สามารถไปหมุนขับให้มอเตอร์ทำงานได้ ดังนั้น จึงต้องส่งสัญญาณนี้เข้าไปในภาคขยายสัญญาณของระบบขับ (Drive Amplified) และส่งสัญญาณต่อไปยังมอเตอร์ป้อน (Feed Motor) แนวแกนที่ต้องการเคลื่อนที่ตามที่โปรแกรมกำหนด ความเร็วและระยะทางการเคลื่อนที่ของแท่นเลื่อน จะต้องกำหนดให้ระบบควบคุมรู้ เนื่องจากระบบควบคุมซีเอ็นซีไม่สามารถมองได้ ดังนั้น จึงต้องออกแบบอุปกรณ์หรือเครื่องมือที่สามารถจะบอกตำแหน่งของแท่นเลื่อนให้ระบบควบคุมได้รู้ อุปกรณ์ชุดนี้เรียกว่า ระบบวัดขนาด (Measuring System) ซึ่งประกอบด้วยสเกลแนวตรง (Liner Scale) มีจำนวนเท่ากับจำนวนแนวแกนในการเคลื่อนที่ของเครื่องจักรกล ทำหน้าที่ส่งสัญญาณไฟฟ้าที่สัมพันธ์กับระยะทางที่แท่นเลื่อนเคลื่อนที่กลับไปยังระบบควบคุม ทำให้ระบบควบคุมรู้ว่าแท่นเลื่อนเคลื่อนที่ไปเป็นระยะทางเท่าใด จากหลักการควบคุมการทำงานดังกล่าว ทำให้เครื่องจักรกลซีเอ็นซีสามารถผลิตชิ้นงานให้มีรูปร่างและรูปทรงให้มีขนาดตามที่ต้องการได้ เนื่องจากการสร้างและการทำงานที่เหนือกว่าเครื่องจักรกลทั่วไป จึงทำให้เครื่องจักรกลซีเอ็นซีเป็นปัจจัยหนึ่งที่มีความสำคัญ



รูปที่ 2.8 หลักการควบคุมการทำงานของเครื่องจักรกล CNC

2.4.2.2. แกนและทิศทางของเครื่องกัดซีเอ็นซี

วิธีการหาคำแหน่งของแนวแกนต่าง ๆ ของเครื่องกัดซีเอ็นซี ทำได้โดยขั้นตอนต่อไปนี้เป็น คือ ให้ผู้ปฏิบัติงานหันหน้าเข้าหาเครื่องกัดซีเอ็นซี แล้วกางนิ้วมือขวาทั้ง 3 นิ้วให้ตั้งฉากกัน โดยทั่วไปแนวแกนของ Spindle ตามหลักของกฎมือขวา ข้อสังเกต คือ ทิศทางที่นิ้วแต่ละนิ้วของมือขวาชี้ออกไป คือ ทิศทางบวกของแต่ละแนวแกน ดังแสดงในรูปที่ 2.9

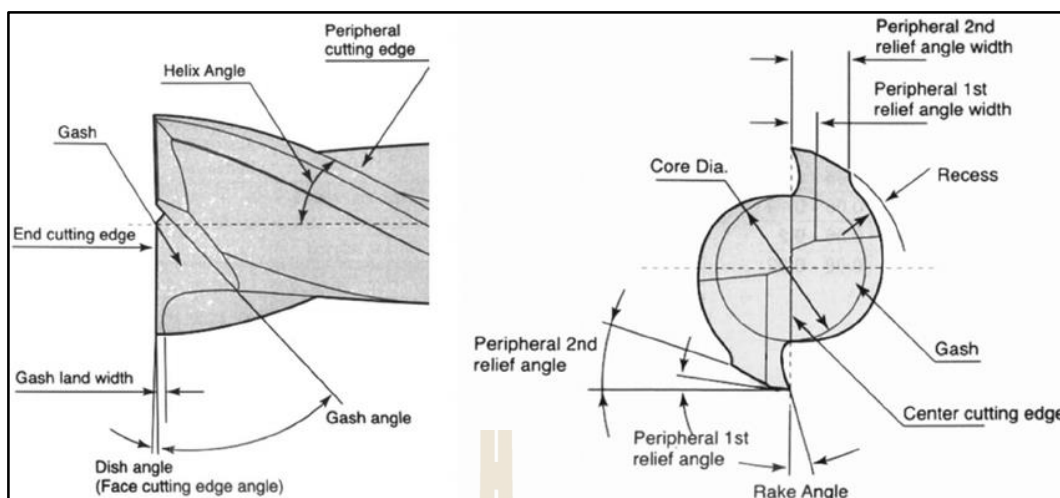


รูปที่ 2.9 แนวแกนของเครื่องกัดซีเอ็นซี

โดยมีจุดศูนย์อ้างอิง (Reference Zero Point) เป็นจุดตัดของทั้ง 3 แกนในการควบคุมและสั่งการระบบการวัดวัดระยะการเคลื่อนที่ของเครื่องมือตัดและแท่นเลื่อน ซึ่งทุกแนวแกนการเคลื่อนที่จะถูกกำหนดระยะด้วยลิมิตสวิตช์ (Limit Switches) ดังนั้นก่อนใช้เครื่องกัดซีเอ็นซี ทุกครั้งจะต้องเลื่อนเครื่องมือตัดกลับไปยังจุดศูนย์อ้างอิง เพื่อให้ชุดควบคุมซีเอ็นซี จำค่าระยะตำแหน่งจุดศูนย์อ้างอิง

2.4.2.3. เครื่องมือตัดสำหรับเครื่องซีเอ็นซี

End Mill เป็นเครื่องมือตัดที่ใช้สำหรับแมชชีนชิ้นงานให้ได้รูปร่างตามแบบที่ต้องการ โดยใช้ร่วมกับเครื่องกัดซีเอ็นซีหรือเครื่องแมชชีนนิ่งเซ็นเตอร์ วัสดุที่ใช้ทำดอก End Mill มีเหล็กกล้ารอบสูง (HSS), คาร์ไบด์ (Carbide) และ Solid Carbide จำนวนคมตัดมีทั้งแบบ 2, 3, 4 หรือ 6 คมตัด และลักษณะของดอก End Mill มีทั้งแบบปลายหน้าตัดตรง (Square) และแบบปลายหน้าตัดครึ่งวงกลม (Ball Nose) สามารถใช้ในงานกัดได้ทั้งแบบงานกัดผิวหยาบและงานกัดผิวละเอียด



รูปที่ 2.10 รูปทรงของเครื่องมือตัด (ดอกกัดเอ็นมิลล์)

ดอก End Mill ส่วนใหญ่ เป็นทรงกระบอกตรงการเลือกดอก End Mill ให้เหมาะสมกับการใช้งานควรพิจารณาจากจำนวนฟันของดอกกัด (Number of Teeth)

- แบบ 1 ฟัน ถูกออกแบบมา เพื่อใช้สำหรับเจาะเนื้อวัสดุที่แข็งและต้องใช้รอบสูงในการเจาะ เพื่อให้เศษหลุดออกมาได้ง่าย เช่น อลูมิเนียม
- แบบ 2 ฟันจะมีร่องคายเศษที่กว้างกว่าเหมาะสำหรับวัสดุที่นิ่ม ใช้ในกรณีกัดร่องลึก เพราะคายเศษได้ดีแต่ แข็งแรงน้อยกว่าแบบหลายฟัน
- แบบ 4,5 และ 6 ฟัน สามารถเก็บรายละเอียดผิวได้สวยกว่า นิยมใช้กับวัสดุแข็งเช่น เหล็ก แต่ร่องคายเศษจะเล็ก จึงคายเศษได้ไม่ดี

วัสดุที่ใช้ในการผลิตดอกเอ็นมิลล์

1. เหล็กกล้าคาร์บอนสูง (High Carbon Steel) ใช้กันในช่วงที่ยังไม่มีการค้นพบเหล็กกล้าความเร็วสูง ผลิตจากเหล็กที่มีเปอร์เซ็นต์คาร์บอน 0.8 % ถึง 1.2 % มีความสามารถในการชุบแข็งได้ดีและสูญเสียความแข็งที่อุณหภูมิประมาณ 300 °C ดังนั้น ข้อจำกัดนี้ จึงทำให้เหมาะสำหรับเครื่องมือตัดขนาดเล็กและความเร็วรอบในการตัดที่ต่ำ ซึ่งจะใช้ในการเมชินวัสดุที่อ่อน

2. เหล็กกล้าความเร็วสูง (High Speed Steel) หรือ HSS ผลิตจากเหล็กผสมพิเศษ เปอร์เซนต์โคบอลต์สูงโดยมีส่วนผสมหลักคือ C, Cr, Mo, W, V, Co, Mn และ Si ที่ให้ความแข็งแรง ทนทานการเสียดสีได้สูง มีความสามารถในการชุบแข็งได้ดี และสามารถรักษาสภาพของคมตัดที่ดีไว้จนอุณหภูมิประมาณ 650 °C

3. ทังสเทนคาร์ไบด์ (Tungsten Carbide) เป็นส่วนผสมระหว่างธาตุทังสเทนและธาตุคาร์บอน การผสมธาตุคาร์บอนจะทำให้ทังสเทน มีความแข็งมาก ทนต่อแรงขีดข่วน จุดหลอมเหลวของทังสเทนสูงกว่า โลหะชนิดอื่น ๆ จึงสามารถทนอุณหภูมิที่สูงได้ เช่น ส่วนประกอบของหัวจรวด

2.4.2.4. อุปกรณ์จับยึดเครื่องมือสำหรับเครื่องกัดซีเอ็นซี

อุปกรณ์จับยึดเครื่องมือ (Tools Holder) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการจับยึดเครื่องมือตัด เช่น ยึด End Mill, ดอกตัดปาด และดอกสว่าน เป็นต้น ดังแสดงในรูปที่ 2.11 ในการจับยึดเครื่องมือตัดบางชนิดอาจจะต้องใช้ปลอกจับ (Collet) มาช่วย ดังแสดงในรูปที่ 2.12 โดยลักษณะของปลอกจับจะมีหลายขนาด ทั้งนี้ก็ขึ้นอยู่กับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเครื่องมือตัดที่ใช้งาน



รูปที่ 2.11 อุปกรณ์จับยึดเครื่องมือ (Tools Holder)



รูปที่ 2.12 ปลอกจับ (Collet)

2.5 ความหยาบผิว (Surface Roughness)

ในงานอุตสาหกรรม การวัดความหยาบผิวของชิ้นงานจากการตัดขึ้นรูปโลหะมีความสำคัญต่อคุณภาพชิ้นงานเป็นอย่างมาก โดยเฉพาะงานที่ต้องการความละเอียดผิวสูง เช่น งานแม่พิมพ์ฉีดพลาสติก ปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อผลการวัดความหยาบผิวมีหลายอย่าง ตั้งแต่การกำหนดค่าความคลาดเคลื่อนของความหยาบผิวในขั้นตอนการออกแบบ การเลือกเครื่องมือที่เหมาะสมและครอบคลุมมาตรฐานที่ต้องการ รวมทั้งการตั้งค่าพารามิเตอร์ของเครื่องมือวัดให้เหมาะสมกับลักษณะของชิ้นงาน

ความหยาบผิว หมายถึง ขนาดความขรุขระของผิว ซึ่งสามารถสัมผัสและแยกแยะได้ด้วยมือและสายตา แต่บางครั้งก็ไม่สามารถแยกแยะได้ด้วยการสัมผัสด้วยมือและสายตา ด้วยเหตุดังกล่าว ในการวัดความหยาบผิวจะใช้เครื่องวัดความหยาบผิว โดยการวัดค่าความหยาบผิวแบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม ได้แก่ การวัดความหยาบผิวโดยเฉลี่ย กับการวัดความหยาบผิวโดยขนาด

2.5.1 ลักษณะของพื้นผิว

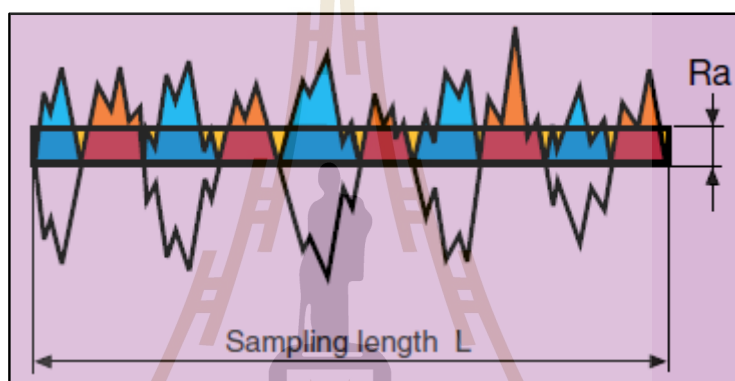
ลักษณะความหยาบผิว มี 3 ชนิด คือ ผิวลักษณะหลัก P (primary profile) ผิวลักษณะความหยาบ R (roughness profile) และผิวคลื่น คือ W (waviness profile) นอกจากนี้ยังมีลักษณะผิวอื่น เช่น WC, WCA, WE, WEA และ IN4776 โดยลักษณะของพื้นผิวนี้อาจสัมพันธ์กับค่าตัวกรอง หรือ Digital filter ซึ่งบ่งบอกถึงความสามารถของการกรองสัญญาณในรูปแบบของเฟส หรือแบบเกาส์เซียน เช่น 2CR-75%, 2CR-50%, 2CR-75% (phase corrected), 2CR-50% (phase corrected), Gaussian -50% (phase corrected) ซึ่งผู้วัดจะต้องกำหนดค่าตัวกรองความถี่ให้สัมพันธ์กับลักษณะของชิ้นงานที่ต้องการวัด ไม่เช่นนั้นจะส่งผลให้ค่าที่วัดออกมาได้นั้นไม่ตรงกับค่าของชิ้นงาน นอกจากนี้เรายังต้องกำหนด Cutoff length หรือระยะทางในการกรองค่าความถี่ของความยาวผิวที่ต้องการวัด และค่า Sampling length คือ ค่าความยาวที่หัววัดเคลื่อนที่บนชิ้นงานที่ต้องการวัดจะต้องปรับตั้งค่าทั้งสองนี้ให้ถูกต้องซึ่งหน่วยความยาวก็จะขึ้นกับมาตรฐานที่ใช้ด้วย เช่น หน่วยนิ้ว หรือ มิลลิเมตร

2.5.2 มาตรฐานการวัดความหยาบผิว

โดยทั่วไปการวัดความหยาบผิวของชิ้นงานสามารถวัดออกมาใน 3 แบบ คือ 1) แสดงค่าสถิติ (Statistical descriptors) เช่น ความหยาบผิวเฉลี่ย R_a ความหยาบผิวรากกำลังสองเฉลี่ย R_q หรือ ความสูงกลางของลักษณะความหยาบ R_c เป็นต้น 2) แสดงค่าสูงสุดต่ำสุด

(Extreme value descriptors) ซึ่งในบางลักษณะงานอาจต้องการแสดงค่าสูงสุดและต่ำสุดของความหยาบผิว เช่น จุดสูงสุด R_p จุดต่ำสุด R_v 3) แสดงค่าลักษณะพื้นผิว (Texture descriptors) เช่น โดยทั้งหมดนี้ ค่าสถิติ R_a เป็นค่าที่ดีที่สุดและได้รับการยอมรับในงานด้านวิศวกรรมมากที่สุด

ค่า R_a คือ ค่าความหยาบผิวเฉลี่ยของพื้นผิวตามอนุกรมเลขคณิตที่ได้จากการรวมพื้นที่ยอดแหลมของคลื่นเหนือเส้นกึ่งกลาง กับพื้นที่ยอดแหลมของคลื่นใต้เส้นกึ่งกลางหารด้วยความยาวเฉลี่ย (L) ดังแสดงในรูปที่ 2.13 ตามข้อกำหนดมาตรฐาน ISO 4287 โดยค่าของ R_a มีหน่วยวัดเป็นไมโครเมตร (μm)



รูปที่ 2.13 ค่าความหยาบผิวเฉลี่ยของพื้นผิวตามอนุกรมเลขคณิต

เครื่องมือวัดความหยาบมีความแตกต่างจากเครื่องมือวัดทั่วไป สิ่งสำคัญประการหนึ่ง คือ มาตรฐานอุตสาหกรรมของเครื่องมือวัด ซึ่งบ่งบอกว่าเครื่องวัดความหยาบผิวรุ่นนั้น ๆ สามารถวัดความหยาบผิวของชิ้นงานตามข้อกำหนดของมาตรฐานใดบ้าง เช่น ISO 4287 : 1997 (ยุโรป), ANSI/ASME B 46.1-1995 (อเมริกา), JIS B 0601-1994 (ญี่ปุ่น) เป็นต้น

2.6 การสึกหรอในเครื่องมือกล

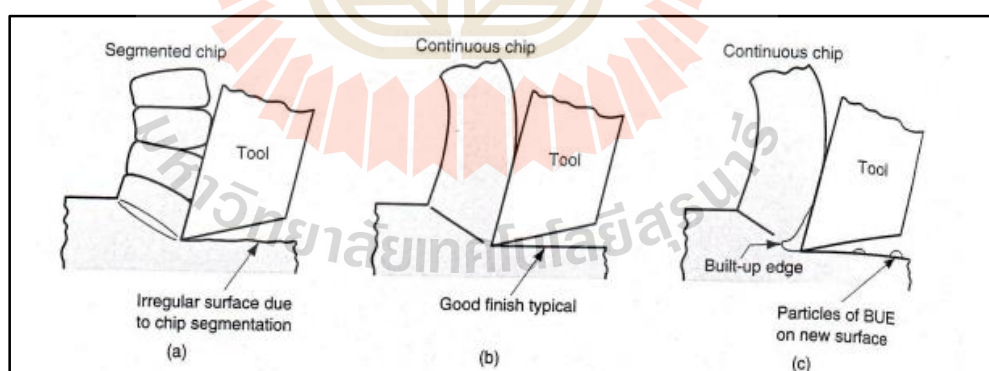
การสึกหรอของเครื่องมือตัด (Tool Wear) คือ การใช้งานจนกระทั่งเครื่องมือตัดหมดสภาพการใช้งานระหว่างการตัดเนื้อที่ถูกกระทำด้วยพลังงานความร้อนและพลังงานกลในการศึกษาการสึกหรอของเครื่องมือกล เราจะต้องเข้าใจศัพท์ของการตัดเนื้อ ซึ่งได้สรุปไว้ในรูปที่ 2.14 ในรูปประกอบจะเห็นว่าชิป (Chip) หรือเศษวัสดุที่ถูกตัดเนื้อจะหลุดออกมาจากผิวชิ้นงาน

โดยเคลื่อนที่ออกทางด้านหน้าเครื่องมือตัดด้วยแรงเฉือนบนเนื้อชิ้นงานที่กระทำอย่างต่อเนื่องชิปที่ถูกเฉือนออกมาสามารถแบ่งได้เป็น 3 ประเภท ได้แก่

1. ชิปปยาวต่อเนื่อง (Continuous chips) ชิปลักษณะนี้ เกิดจากการเฉือนหรือกัดแต่งโลหะที่มีความยืดหยุ่นสูง (Ductile) ในขณะที่เนื้อโลหะถูกกัดออกมาเป็นชิปจะมีการแปรรูปแบบพลาสติกของโลหะที่นำมากัดแต่งค่อนข้างมาก ทำให้มีความร้อนจากการแปรรูปเกิดขึ้น ชิปที่ได้มีลักษณะโค้งยาวคล้ายสปริง

2. ชิปปยาวต่อเนื่องและมี Built up edge เกิดขึ้น (Continuous chips with “Built up edge”) คล้ายกับชิปปยาวต่อเนื่องในข้อแรก แต่เมื่อชิปแตกหลุดออกจากชิ้นงานจะทำให้ผิวชิ้นงานที่มีรอยแตกซึ่งเป็นผิวใหม่ที่ยังสะอาดปราศจากสารประกอบใด ๆ และมีความไวต่อปฏิกิริยาเคมีสูงสามารถเชื่อมติดไปบนผิวของเครื่องมือกล กลายเป็น Built up edge ได้

3. ชิปปสั้นไม่ต่อเนื่อง (Discontinuous chips) ชิปลักษณะนี้เกิดจากการตัดเฉือนโลหะที่มีความยืดหยุ่นไม่สูงมาก ชิปจะเกิดจากการแปรรูปแบบพลาสติกเพียงเล็กน้อยแล้วจึงแตกหลุดออก จึงมีลักษณะสั้นและไม่ต่อเนื่อง ถ้าโลหะที่นำมากัดแต่งมีเฟสที่ 2 ในโครงสร้าง เช่น อนุภาคของสารประกอบซัลไฟด์ ก็จะสามารถช่วยตัดชิปให้สั้นลงได้ นอกจากนี้ยังสามารถควบคุม Built up edge ให้อยู่ในปริมาณที่ไม่สูงมากได้เช่นกัน



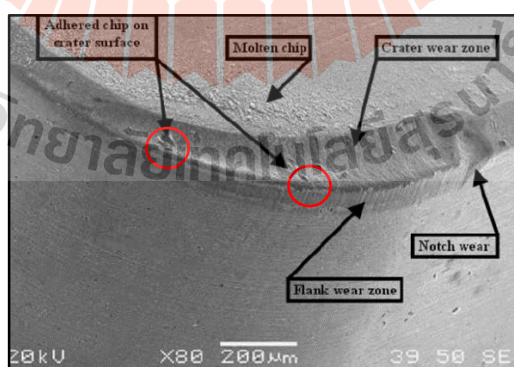
รูปที่ 2.14 ชิปที่ถูกเฉือนออกมา (a) Discontinuous chips (b) Continuous chips
(c) Continuous chips with “Built up edge”

ในการใช้งานจะต้องระวังไม่ให้เกิด Built up edge ที่หนาจนเกินไป เนื่องจากการที่ผิวเครื่องมือกลมีเศษวัสดุที่ผ่านการแปรรูปแบบพลาสติกอย่างรุนแรงมาเกาะอยู่จะทำให้เสียขอบตัด ซึ่งจะส่งผลเสมือนว่าเครื่องมือกลนั้น “ทื่อ” ลง ทำให้ประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องมือกลนั้นลดลง โดยทั่วไปในการใช้งานจะพบว่า Built up edge เกิดขึ้นและแตกหลุดออกอย่างต่อเนื่องตลอดเวลา โดยอาจเกิดขึ้นได้หลายรอบใน 1 วินาที เศษของ Built up edge ที่หลุดออกมักจะไปเกาะติดอยู่กับผิวด้านใต้ของชิป ช่วยเพิ่มปริมาณการสึกหรอด้านหน้าเรก (Rake face) ของเครื่องมือกลและยังทำให้ผิวสำเร็จ (Surface finish) ที่ได้ไม่ดีเท่าที่ควร หากนำเศษของ Built up edge มาวัดค่าความแข็งบางทีจะพบว่า มีความแข็งสูงกว่าวัสดุที่นำมากัดแต่งได้ถึง 3 เท่า ทั้งนี้เนื่องจากวัสดุ Built up edge ได้ผ่านกระบวนการทำให้แข็งด้วยความเครียด (Work hardening) จากการแปรรูปที่รุนแรงมาหลายครั้งนั่นเอง

2.6.1 กลไกของการสึกหรอ

การสึกหรอของเครื่องมือกลสามารถเกิดได้ทั้งบนด้านหน้าเรก (Rake face) และหน้าแฟรงก์ (Flank face) ซึ่งการสึกหรอพบว่ามีกลไกพื้นฐาน ดังนี้

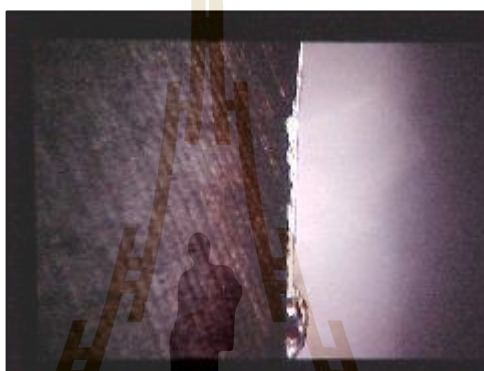
1. การสึกหรอแบบแนบติด (Adhesive Wear) การสึกหรอในลักษณะนี้เกิดจากการที่ผิวสัมผัสเชื่อมติดกันเป็นจุดเล็ก ๆ ทำให้เกิดการสูญเสียเนื้อของเครื่องมือกลให้แก่ชิปหรือผิวกัดแต่งของชิ้นงาน



รูปที่ 2.15 การสึกหรอแบบแนบติด (Adhesive Wear)

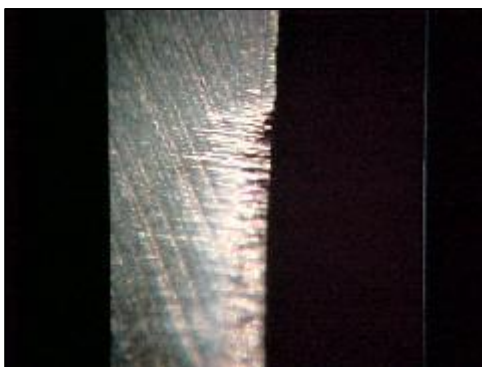
(Alaattin Kacal, 2557)

2. การสึกหรอจากการแพร่ (Diffusion Wear) ในขณะใช้งานจะพบว่ามีการแพร่ของอะตอมระหว่างผิวของเครื่องมือกลและผิวชิ้นงานเกิดขึ้นอยู่ตลอดเวลา การแพร่ของอะตอมจะทำให้ผิวสัมผัสเชื่อมติดกันได้ง่ายขึ้น ซึ่งจะนำไปสู่การแตกหักของยอดสูงในที่สุด กลไกการแพร่และการเชื่อมติดนี้เป็นสาเหตุหลักของการสึกหรอแบบครีเตอร์ ยกตัวอย่าง เช่น ในการกัดแต่งเหล็กกล้าด้วยเครื่องมือกลที่เป็นวัสดุประกอบ WC-Co ธาตุเหล็ก (Fe) จากชิ้นงานสามารถแพร่เข้าไปในเหล็กกล้า ได้เช่นเดียวกัน



รูปที่ 2.16 การสึกหรอจากการแพร่ (Diffusion Wear)

3. การสึกหรอแบบขัดถู (Abrasive Wear) การสึกหรอลักษณะนี้จะเกิดในกรณีที่ชิ้นงานที่นำมากัดแต่งมีเฟสที่สองที่มีความแข็งสูงอยู่ในโครงสร้าง เช่น เฟสคาร์ไบด์หรือไนไตรด์ในเหล็กกล้าและเหล็กหล่อ อนุภาคอะลูมินา (Al_2O_3) ในเหล็กกล้า เฟสของซิลิคอนและอะลูมินาในอลูมิเนียมผสม เป็นต้น



รูปที่ 2.17 การสึกหรอแบบขัดถู (Abrasive Wear)

2.6.2 ชนิดการสึกหรอของเครื่องมือตัดบนคมตัด

การสึกหรอของเครื่องมือตัดบนคมตัดโดยทั่วไปสามารถแบ่งออกได้เป็น 8 ชนิดดังต่อไปนี้

1. การสึกหรอบนผิวหلب (Flank Wear) เกิดจากการเคลื่อนที่สัมผัสระหว่างหน้าแฟรงก์กับชิ้นงาน เป็นการสึกหรอที่ค่อนข้างสม่ำเสมอ ถ้าการสึกหรอขยายไปถึงขอบตัดจะทำให้แรงตัดและความเค้นเกิดกับเครื่องมือสูงขึ้น

2. การสึกหรอบนผิวคาย (Crater Wear) เป็นความเสียหายที่เกิดบนหน้าเรกหรือด้านบนของเครื่องมือตัด ส่วนใหญ่จะพบในงานกัดของเหล็กกล้าความเร็วสูง การสึกหรอในลักษณะนี้เกิดจากปฏิกิริยาเคมีระหว่างชิปกับวัสดุเครื่องมือกลที่อุณหภูมิใช้งานค่อนข้างสูง ในระหว่างการตัดเนื้อ วัสดุเครื่องมืออาจละลายเข้าไปอยู่ในชิป หรืออนุภาคขนาดเล็กจากเครื่องมืออาจถูกดึงติดไปกับชิปได้ แต่ไม่ว่าจะเป็นกรณีไหนก็จะเป็นหลุมดินบนผิวเครื่องมือตัดขึ้น เครื่องมือตัดที่เกิดการสึกหรอแบบครีเตอร์ในปริมาณที่สูงขึ้น ถ้าทิ้งไว้นานก็จะทำให้เครื่องมือตัดแตกในที่สุด

3. การสึกหรอเนื่องจากการเปลี่ยนรูป (Plastic Deformation) เกิดเนื่องจากขณะทำงาน ผิวสัมผัสได้รับความร้อนและแรงกดสูง ซึ่งสามารถทำให้วัสดุเครื่องมือหรือวัสดุที่เป็นเนื้อหลัก อ่อนตัวลงจนอนุภาคคาร์ไบด์สามารถเคลื่อนที่ได้บ้าง วัสดุเครื่องมือจะค่อย ๆ สึกหรอไป คล้ายการสึกหรอแบบครีเตอร์แต่ที่ปลาย (Nose) จะเริ่มบิดเบี้ยวเสียรูป ทำให้ชิ้นงานที่ผลิตไม่ได้ ความเที่ยงตรงและเครื่องมืออาจแตกหักได้

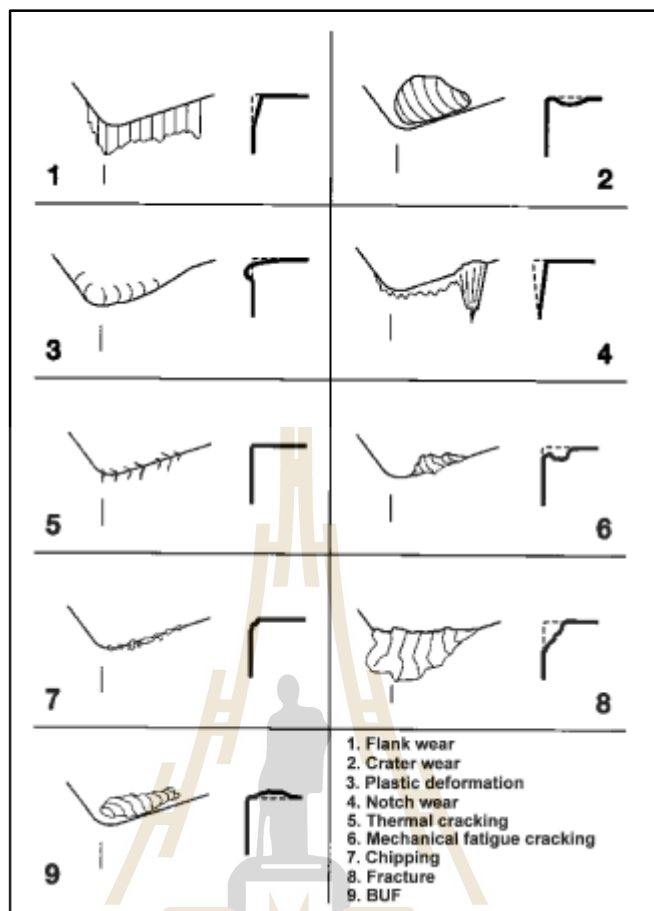
4. การสึกหรอลักษณะแหว่ง (Notch Wear) เกิดจากงานกัดแต่งวัสดุประเภท เหล็กกล้า ไร้นิม โลหะผสมที่ใช้งานที่อุณหภูมิสูง และวัสดุที่ผ่านการทำให้แข็งด้วยความเครียด (Work hardening) ซึ่งเป็นวัสดุที่ทำให้เกิดความร้อนจากการกัดแต่งสูง จึงอาจทำให้มีรอยบาก (Depth-of-cut notching) เกิดขึ้นที่ปลายชิป ส่งผลให้เกิด Burr และอาจทำให้เครื่องมือกลแตกได้

5. การแตกร้าวเนื่องจากความร้อน (Thermal Cracking) เกิดจากการที่มีความแตกต่างของอุณหภูมิสูงมากระหว่างขอบตัดและเนื้อในเครื่องมือ ทำให้เกิดรอยแตกเนื่องจากความเค้นจากการขยายตัวต่างกันกับขอบตัด โดยเฉพาะอย่างยิ่งในงานที่มีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิสูงอย่างรวดเร็ว รอยแตกเหล่านี้จะโตขึ้นอย่างต่อเนื่องและอาจทำให้เครื่องมือกลแตกได้

6. การสึกหรอที่ปลายมีด (Nose Wear) เป็นความเสียหายที่เกิดจากการกัดแต่ง โลหะแข็ง โดยอาจเกิดจากการเสียดสี การขัดถูและการเสีรูปร่างของปลายเครื่องมือตัด ซึ่งจะส่งผลต่อความละเอียดของผิวสำเร็จและความเที่ยงตรงของชิ้นงานที่ผลิต

7. การกะเทาะ (Chipping) และการแตกหัก (Fracture) เกิดจากแรงตัดที่ใช้ที่ไม่คงที่ การตัดที่ต้องหยุดบ่อย ๆ หรือแม้กระทั่งจากการที่เครื่องจักรสั่นสะเทือนมากขณะใช้งานก็ทำให้เครื่องมือตัดแตกได้ ความเสียหายจากกลไกอื่นที่กล่าวมาก็อาจทำให้ความแข็งแรงของเครื่องมือกลลดลงจนแตกหักได้ นอกจากนี้ถ้าแรงตัดที่ใช้เพิ่มขึ้นจากสาเหตุใดก็ตามจนถึงจุดที่เครื่องมือกลไม่สามารถรับได้แล้วก็จะเกิดการแตกได้

8. การพอกเศษ (Built-Up Edge) เกิดจากการที่เนื้อวัสดุจากชิ้นงานมาเชื่อมติดกับผิวเครื่องมือกล ทับถมเป็นชั้นขึ้นมา ที่หนาเกินไปหรือไม่มีเสถียรภาพทางเคมีจะทำให้แรงกดของเครื่องมือเพิ่มขึ้น ผิวสำเร็จแย่ง ความแม่นยำในการกัดแต่งลดลง และอาจทำให้เครื่องมือแตกหัก



รูปที่ 2.18 ชนิดการสึกหรอของเครื่องมือตัดบนคมตัด
(Sandvik Coromant, 2537)

2.6.3 ข้อกำหนดในการวัดขนาดของการสึกหรอบนผิวหلب (Flank Wear)

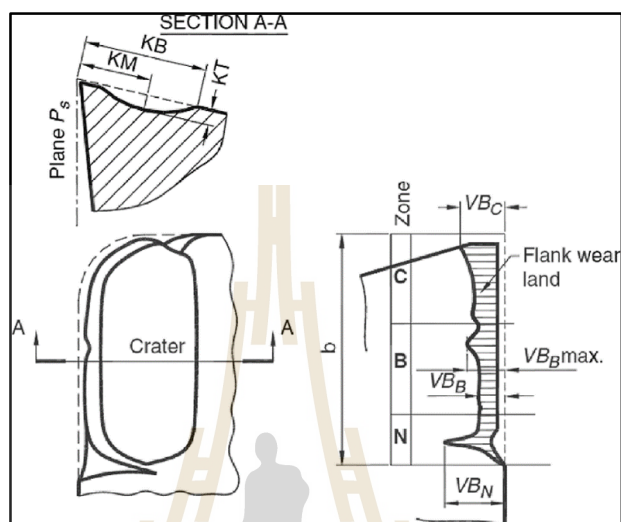
ตามมาตรฐาน ISO 3685 : 1993

ตามมาตรฐาน ISO ได้มีการแบ่งเขตการสึกหรอบนผิวหلب (Flank Wear) เพื่อการวัดระยะของการสึกหรอบนผิวหلب (Flank Wear) ออกเป็น 3 เขต คือ เขต A เขต B และเขต C โดยกำหนดให้ b เป็นระยะป้อนลึกในการตัดเฉือนชิ้นงาน

- เขต N เป็นเขตที่อยู่บนผิวหلبด้านในสุดของคมตัด มาตรฐาน ISO 3685 : 1993 (E) ได้ กำหนดให้เขต N มีค่าเท่ากับ 1 ใน 4 ของ b (เมื่อ b = ระยะป้อนลึก) ดังแสดงในรูปที่ 2.19

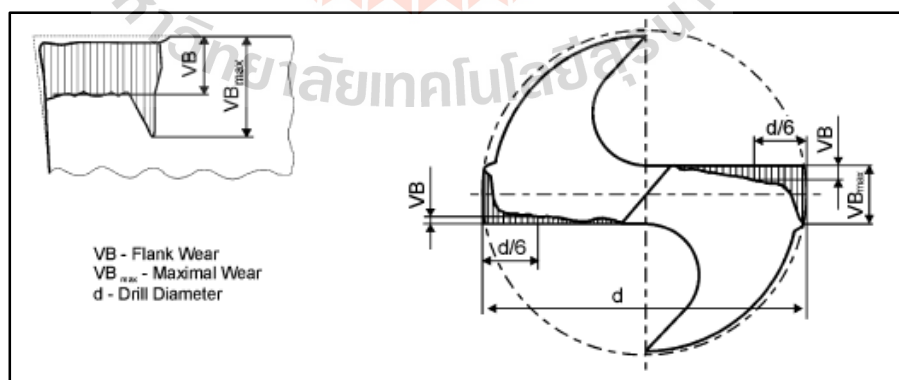
- เขต B เป็นเขตที่อยู่บนผิวหلبเช่นเดียวกับเขต A และเขต B ก็เป็นเขตที่อยู่ระหว่างเขต A กับเขต C มาตรฐาน ISO 3685 : 1993 (E) ไม่ได้กำหนดช่วงกว้างของเขต B แต่จะกำหนดให้ช่วงกว้างของเขต B ขึ้นอยู่กับช่วงกว้างของเขต A และเขต C ดังแสดงในรูปที่ 2.19

- เขต C เป็นเขตที่อยู่บนผิวหลบเช่นเดียวกับเขต A และเขต B เขต C จะอยู่นอกสุดของคมตัดและเขต C ก็อยู่ติดกับเขต B มาตรฐาน ISO 3685 : 1993 (E) ได้กำหนดให้เขต C มีช่วงกว้าง เท่ากับรัศมีปลายมีด (Nose) ดังแสดงในรูปที่ 2.19



รูปที่ 2.19 การแบ่งเขตการสึกหรอบนผิวหลบ (Flank Wear)

โดยกำหนดให้ทำการวัดขนาดการสึกหรอบนผิวหลบ V_B เป็นขนาดการสึกหรอบนผิวหลบเฉลี่ย ส่วน V_{Bmax} เป็นขนาดการสึกหรอบนผิวหลบสูงสุด ดังแสดงในรูปที่ 2.20

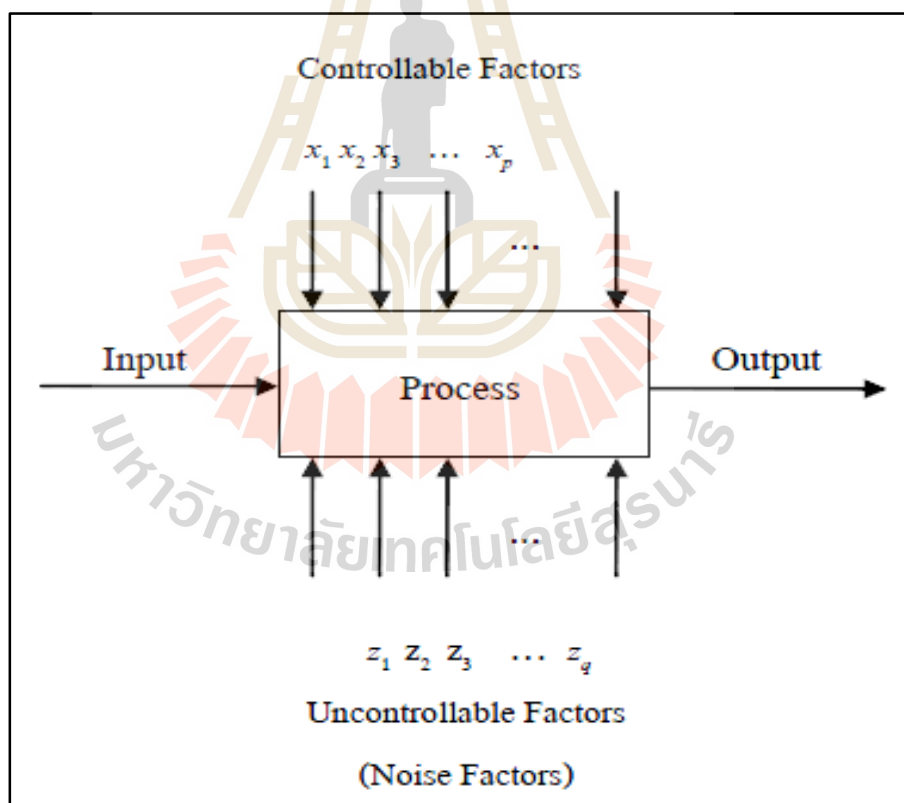


รูปที่ 2.20 การวัดขนาดการสีกหรือบนผิวหลอด

(Slavko Dolinsek, 2544)

2.7 การทดลองและการออกแบบการทดลอง

Montgomery กล่าวว่า การทดลอง หมายถึง การทดสอบหรือการลองเพื่อหาผลลัพธ์ที่อยู่ภายใต้ความไม่แน่นอนสามารถกระทำได้ 2 วิธี คือ การทดลองปฏิบัติงานจริง (Physical Experiment) และการทดลองด้วยการจำลองผล (Simulation) จุดประสงค์ที่สำคัญของการทดลองมี 2 ประการ คือ เป็นการยืนยันข้อเท็จจริง เพื่อพิสูจน์ถึงข้อเท็จจริงหรือความเชื่อจากประสบการณ์หรือทฤษฎีบางอย่างที่อธิบายเกี่ยวกับกระบวนการผลิต และเป็นการค้นหาข้อเท็จจริงเพื่อศึกษาถึงอิทธิพลของเงื่อนไขใหม่ที่มีต่อระบบการผลิต ซึ่งผลลัพธ์และข้อสรุปที่เกิดขึ้นจะขึ้นอยู่กับวิธีการเก็บข้อมูล กล่าวคือตามปกติแล้วการทดลองถูกนำมาใช้เพื่อศึกษาถึงประสิทธิภาพในการทำงานของกระบวนการและระบบ ซึ่งทั้งกระบวนการและระบบสามารถที่จะแทนด้วยแบบจำลองดังแสดงในรูปที่ 2.21



รูปที่ 2.21 รูปแบบระบบการทดลองทั่วไป

(Vernon R. Anthony, 2559)

อาจมองได้ว่า กระบวนการคือ การรวมเอาคนงาน เครื่องจักร วิธีการ และทรัพยากรอื่น ๆ เข้าด้วยกัน เพื่อเปลี่ยนอินพุต (เช่น วัตถุดิบ) ไปสู่เอาต์พุตที่มีผลตอบออกมาในรูปแบบหนึ่งหรือมากกว่าซึ่งเราสามารถเห็นได้ ตัวแปรกระบวนการบางชนิด x_1, x_2, \dots, x_p เป็นตัวแปรที่เราสามารถควบคุมได้ ในขณะที่ตัวแปรบางตัว z_1, z_2, \dots, z_q เป็นตัวแปรที่เราไม่สามารถควบคุมได้ ดังนั้นวัตถุประสงค์ของการทดลองอาจเกี่ยวข้องกับ

- 1) การหาปัจจัยที่มีอิทธิพลมากที่สุดต่อผลตอบ y
- 2) การหาวิธีการตั้งค่า x ที่มีผลต่อค่าผลตอบ y เพื่อให้ค่า y ได้ตามค่าที่ต้องการ
- 3) การหาวิธีการตั้งค่า x ที่มีผลต่อค่าผลตอบ เพื่อให้ค่า y น้อยที่สุด
- 4) การหาวิธีการตั้งค่า x ที่มีผลต่อค่าผลตอบ y เพื่อให้ผลของตัวแปรที่เราไม่สามารถควบคุมได้ z_1, z_2, \dots, z_q มีค่าต่ำสุด

การทดลองส่วนมากจะเกี่ยวข้องกับปัจจัยหลายตัว ถ้าต้องการให้การทดลองเกิดประสิทธิภาพในการวิเคราะห์ผลได้สูงสุด เราจะต้องนำวิธีการทางวิทยาศาสตร์เข้ามาช่วยในการวางแผนการทดลอง คำว่า การออกแบบการทดลองเชิงสถิติ (Statistical Design of Experiment) หมายถึง กระบวนการในการวางแผนการทดลองเพื่อจะได้มาซึ่งข้อมูลที่สมเหตุสมผลวิธีการออกแบบการทดลองในเชิงสถิติเป็นสิ่งที่จำเป็น เมื่อต้องการหาข้อสรุปที่มีความหมายจากข้อมูลที่มีอยู่และถ้ายังเป็นปัญหาที่เกี่ยวข้องกับความผิดพลาดในการทดลอง (Experiment Error) วิธีการทางสถิติเป็นวิธีการเพียงอย่างเดียวเท่านั้น ที่จะสามารถนำมาใช้ในการวิเคราะห์ผลการทดลองนั้นได้ ดังนั้นสิ่งสำคัญ 2 ประการ สำหรับปัญหาที่เกี่ยวกับการทดลองก็คือ การออกแบบการทดลองและการวิเคราะห์ข้อมูลเชิงสถิติ ซึ่งศาสตร์ทั้ง 2 นี้มีความเกี่ยวข้องกันอย่างมาก ทั้งนี้เพราะว่าวิธีการวิเคราะห์เชิงสถิติที่เหมาะสมนั้นจะขึ้นกับการออกแบบการทดลองที่จะนำมาใช้

2.7.1 คำศัพท์ที่ควรรู้จักเกี่ยวกับการทดลอง

1. การทดลอง (Experiment) ตัวแปรอิสระ หรืออาจเรียกได้ว่าตัวแปรทดลอง (Experimental Variable) เพื่อดูตัวแปรตามซึ่งเป็นผลที่เกิดขึ้นเนื่องมาจากผลของตัวแปรอิสระนั้น ในการจัดการกระทำจะพยายามจัดสภาพตัวแปรใหม่เพื่อควบคุมสิ่งที่เกี่ยวข้องหรือตัวแปรเกินที่ไม่ต้องการศึกษามีให้มา มีผลต่อตัวแปรตามที่ต้องการศึกษา

2. แผนการทดลอง (Experimental Design) เป็นแผนการทั่วไปของการทดลอง ซึ่งเกี่ยวข้องกับจำนวนและการจัดการตัวแปรอิสระ รวมทั้งการสุ่มหรือเลือกตัวอย่างและการกำหนดเงื่อนไขในการทดลองเพื่อควบคุมตัวแปรแทรกซ้อนหรือตัวแปรเกินมิให้มีผลต่อตัวแปร

ตาม เป็นการควบคุมหรือป้องกันความคลาดเคลื่อนที่จะมีส่วนเกี่ยวข้องกับการทดลอง แผนการทดลองมีหลากหลายชนิด แต่ละชนิดจะมีความเหมาะสมต่อปัญหาที่จะศึกษาทดลองแตกต่างกัน แผนการทดลองที่ดีจะต้องดำเนินการทดลองได้ง่ายและให้คำตอบที่ถูกต้องตามวัตถุประสงค์ที่ต้องการศึกษา

3. ตัวแปร (Variable) หมายถึง ลักษณะของสิ่งที่สนใจศึกษา ที่สามารถแปรเปลี่ยนค่าได้ตามเวลาหรือบุคคลหรือสถานที่หรือคุณลักษณะที่แตกต่างกัน อายุ น้ำหนัก ส่วนสูง เพศ พันธุ์พืช พันธุ์สัตว์ ขนาดของแปลง ชนิดของปุ๋ย ปริมาณของปุ๋ยที่ใช้ในการทดลอง สูตรอาหารที่ใช้ในการเลี้ยงสัตว์ เป็นต้น การแปรเปลี่ยนค่าของตัวแปรนั้น เรียกว่า ระดับของตัวแปร เช่น เพศ แบ่งเป็น เพศชาย กับ เพศหญิง ดังนั้น เพศ เป็นตัวแปรที่มี 2 ระดับ

4. ตัวแปรอิสระ (Independent Variable) บางครั้งเรียกว่า ปัจจัย (Factor) หมายถึง ตัวแปรที่เกิดขึ้นก่อน และเป็นตัวแปรเหตุที่ทำให้ผลหรือสิ่งที่เกี่ยวข้องเปลี่ยนแปลงคุณลักษณะหรือแปรสภาพไป

5. ตัวแปรตาม (Dependent Variable) หมายถึง ตัวแปรที่เกิดขึ้นทีหลังหรือต้องเปลี่ยนแปลงแปรสภาพหรือคุณลักษณะไปตามอิทธิพลของตัวแปรอิสระ

6. ตัวแปรแทรกซ้อนหรือตัวแปรเกิน (Extraneous Variable) หมายถึง ตัวแปรที่ไม่ต้องการศึกษาในขณะนั้น ซึ่งตัวแปรเกินจะมีลักษณะเหมือนตัวแปรอิสระที่มีผลหรืออาจมีผลต่อตัวแปรตามที่ต้องการศึกษา ทำให้การวัดค่าตัวแปรตามคลาดเคลื่อนไปได้ ดังนั้น ในการทดลองจึงต้องพยายามควบคุมหรือขจัดอิทธิพลของตัวแปรเกินที่มีผลต่อตัวแปรตามให้หมดไปหรือให้เกิดขึ้นน้อยที่สุด เพื่อให้ผลของตัวแปรตามที่ได้จากการทดลองเป็นผลแท้จริงที่เกิดจากตัวแปรอิสระที่ทดลองเท่านั้น ตัวแปรชนิดนี้ผู้วิจัยสามารถคาดได้ว่าจะมีอะไรบ้าง จึงสามารถทำการควบคุมล่วงหน้าได้

7. ปัจจัย (Factor) หมายถึง ตัวแปรอิสระที่ต้องการศึกษาว่ามีผลกระทบต่อตัวแปรตามหรือไม่ เช่น ในการศึกษาเกี่ยวกับอาหาร 3 สูตร ที่ใช้ในการเลี้ยงไก่ ปัจจัยที่ต้องการศึกษา คือ อาหาร (ตัวแปรอิสระ)

8. ระดับของปัจจัย (Factor Levels) หมายถึง ชนิดย่อย ๆ หรือประเภทต่าง ๆ ของปัจจัย บางครั้งเรียกว่า ทรีทเมนต์ (Treatment)

9. ปัจจัยเดียวและปัจจัยพหุ (Single Factor and Multiple Factor) เป็นการศึกษาตัวแปรอิสระเพียงตัวแปรเดียว ส่วนปัจจัยพหุเป็นการศึกษาเกี่ยวกับตัวแปรอิสระมากกว่า 1 ตัว

10. ทรีทเมนต์ (Treatment) หมายถึง ระดับต่างๆของปัจจัย หรือวิธีการต่าง ๆ ที่ใช้ปฏิบัติต่อหน่วยทดลองแล้วหน่วยทดลองจะส่งผลตอบสนองออกมาเป็นข้อมูลเพื่อนำไป

เปรียบเทียบอิทธิพลของทรีทเมนต์ ตามวัตถุประสงค์ของการทดลองโดยที่ทรีทเมนต์อาจมาจากปัจจัยเดียวหรือหลายปัจจัยร่วมกัน (Treatment Combination)

11. หน่วยทดลอง (Experimental Unit) หมายถึง หน่วยหรือกลุ่มของสิ่งทดลอง (ซึ่งในงานวิจัยจะเรียกว่า Experimental Material) ที่ใช้ในการทดลองโดยได้รับอิทธิพลของทรีทเมนต์เดียวกันในการกระทำครั้งใดครั้งหนึ่งโดยหน่วยทดลองอาจเป็น ต้นไม้ 1 ต้น พืช 1 แปลง สัตว์ทดลอง 1 ตัว หรือสัตว์ทดลอง 5 ตัวในกรงเดียวกัน เช่น ในการทดลองสูตรอาหารที่ใช้เลี้ยงไก่ ถ้าใน 1 กรงขังไก่ไว้ 5 ตัว และให้ไก่ทั้ง 5 ตัว นี้ได้รับอาหารสูตรเดียวกัน น้ำหนักที่เพิ่มขึ้นของไก่ทั้งกรง (5 ตัว) ก็จะเป็น 1 หน่วยทดลอง แต่ถ้าใน 1 กรง ขังไก่ไว้ 1 ตัว แต่ละตัวก็จะเป็น 1 หน่วยทดลอง หรือในการเปรียบเทียบพันธุ์พืช พืช 1 แปลงไม่ว่าจะใหญ่หรือเล็ก จะเป็น 1 หน่วยทดลอง

12. หน่วยตัวอย่าง (Sampling Unit) หมายถึง ส่วนหนึ่งของหน่วยทดลองหรือทั้งหน่วยทดลอง ซึ่งใช้วัดอิทธิพลของทรีทเมนต์ตามจุดประสงค์ของการทดลอง

13. ความคลาดเคลื่อนของการทดลอง (Experimental Error) หรือความผันแปรของการทดลอง หมายถึง ความแตกต่างระหว่างหน่วยทดลองที่ได้รับ ทรีทเมนต์เดียวกัน การที่หน่วยทดลองหลาย ๆ หน่วยได้รับทรีทเมนต์เดียวกันแต่ให้ผลตอบสนองต่อทรีทเมนต์แตกต่างกันอาจเกิดได้จาก 2 สาเหตุ คือ

- ความผันแปรที่เกิดขึ้นภายในหน่วยทดลอง (Inherent Variability) เป็นความผันแปรที่เกิดขึ้นจากความแตกต่างของหน่วยทดลองอยู่แล้ว เช่น ในการทดลองเกี่ยวกับสัตว์อาจมีความแตกต่างที่เกิดจาก อายุ เพศ หรือน้ำหนักเริ่มต้นของหน่วยทดลองก่อนทำการทดลองหรือในการทดลองเกี่ยวกับพืชมีความแตกต่างที่อาจจะเกิดจากความอุดมสมบูรณ์ของดินในแปลงทดลองไม่เท่ากันหรือมีความชื้นต่างกัน

- ความผันแปรที่เกิดขึ้นภายนอกหน่วยทดลอง (Extraneous Variability) เป็นความผันแปรที่เกิดขึ้นในขณะที่ทำการทดลอง ซึ่งอาจจะเกิดความผิดพลาดของผู้ทดลอง โดยอาจเกิดจากการปฏิบัติไม่สม่ำเสมอหรือไม่เหมือนกัน เช่น การให้อาหารหรือน้ำไม่เท่ากัน การใส่ปุ๋ยหรือการปราบวัชพืชแตกต่างกัน หรืออาจเกิดจากการใช้เครื่องมือที่ไม่ได้มาตรฐาน การขาดความละเอียดลออในการบันทึกข้อมูล (พิสมัย หาญมงคลพิพัฒน์, 2550)

2.7.2 การออกแบบการทดลอง

การออกแบบการทดลอง (Design of Experiments, DOE) คือแนวคิดทางสถิติที่ใช้ในการพัฒนาผลิตภัณฑ์และกระบวนการผลิตช่วยเพิ่มผลผลิต ช่วยลดความผันแปรในกระบวนการผลิต ช่วยลดเวลาในการผลิต และช่วยลดต้นทุนการผลิต เพื่อประโยชน์ในการพัฒนาและปรับปรุงกระบวนการผลิตและผลิตภัณฑ์ โดยคำนึงถึงคุณภาพสูงสุดตามความต้องการของลูกค้าเป็นสิ่งสำคัญ

กล่าวว่าการออกแบบการทดลอง คือ การกำหนดเงื่อนไขสำหรับการทดลองที่จะทำให้สามารถตีความหมายถึงสาเหตุและผลที่ต้องการตัดสินใจได้ กล่าวคือ เป็นการออกแบบการทดลองเพื่อตรวจสอบว่าปัจจัย (Factor) ใดหรือตัวแปร (Input Variable) ใดที่มีผลต่อสิ่งที่ไม่สำคัญหรือสิ่งที่สนใจในลักษณะของผลิตภัณฑ์ที่ออกมา (Output Response) ปัจจัยในการผลิตสามารถแบ่งออกได้เป็น

1. ปัจจัยที่ควบคุมได้ (Controllable Factors) หมายถึง ปัจจัยที่สามารถกำหนดค่าของปัจจัยนั้นได้ในการผลิต

2. ปัจจัยที่ควบคุมไม่ได้ (Uncontrollable Factors) หมายถึง ปัจจัยที่ไม่สามารถกำหนดค่าของปัจจัยนั้นได้ในการผลิต

ดังนั้น การออกแบบการทดลอง จึงเป็นการกำหนดเงื่อนไขที่จะทำให้ค่าความแตกต่างของข้อมูลมีสาเหตุจากสิ่งที่ไม่สามารถควบคุมได้เท่านั้น เพื่อให้เกิดข้อมูลที่มีสาระมากที่สุดเพื่อสำหรับการตัดสินใจ

2.7.2.1. หลักการพื้นฐาน 3 ประการ สำหรับการออกแบบการทดลอง คือ

1. การทดลองซ้ำ (Replication) คือ การทำการทดลองภายใต้เงื่อนไขการทดลองเดียวกันมากกว่า 1 ครั้ง เพื่อให้ได้ข้อมูลเกี่ยวกับการทดลองเพิ่มมากขึ้น และยังทำการทดลองเพิ่มมากขึ้นเท่าใด ก็จะได้ข้อมูลจากการทดลองเพิ่มมากขึ้นเท่านั้น เพื่อเป็นการยืนยันความถูกต้องของผลการทดลองและเพิ่มความเที่ยงตรง แม่นยำของข้อมูลมากยิ่งขึ้น ซึ่งส่งผลให้การวิเคราะห์และผลการสรุปจากการทดลอง มีความถูกต้องแม่นยำมากขึ้น โดยการทดลองซ้ำมีประโยชน์ คือ ช่วยให้ผู้ที่ทดลองสามารถประมาณค่าความผิดพลาดในการทดลองได้ ซึ่งใช้สำหรับเปรียบเทียบกับผลของปัจจัยที่สนใจศึกษาได้ – สิ่งที่ต้องพิจารณา คือ การกำหนดจำนวนซ้ำ ซึ่งจะต้องทำอย่างเป็นอิสระต่อกัน ประโยชน์ของการทำซ้ำ คือ ทำให้ผู้ทำการทดลองสามารถรู้ค่าประมาณที่เกิดความผิดพลาดจากการทดลองเป็นผลให้ผู้ทำการทดลองใช้เป็นเครื่องมือในการสรุปผลความแตกต่างใน

เชิงสถิติได้ ถ้ามีจำนวนซ้ำน้อยเกินไป ความแม่นยำในการทดลองอาจมีน้อยไป ในขณะที่เดียวกัน ถ้ามีจำนวนซ้ำมากเกินไป ก็อาจทำให้เสียค่าใช้จ่ายและเสียเวลาเกินความจำเป็น ดังนั้น การกำหนดจำนวนซ้ำจึงจำเป็น ซึ่งการกำหนดจำนวนซ้ำ สามารถหาได้โดยใช้ OC-curve (operating characteristic curve)

2. การสุ่ม (Randomization) คือ การจัดลำดับในการทดลองให้เป็นแบบสุ่ม โดยการสุ่มสามารถช่วยลดความผิดพลาดในการวิเคราะห์ผลการทดลอง ซึ่งการสุ่มจะช่วยกระจายความผิดพลาดในการทดลองที่ไม่สามารถหลีกเลี่ยงได้ไปสู่ทุก ๆ การทดลองด้วยโอกาสและขนาดเท่า ๆ กัน เพื่อให้ความผิดพลาดในการวิเคราะห์ผลเกิดขึ้นน้อยที่สุด ลดค่าความคลาดเคลื่อนจากการทดลองและหลีกเลี่ยงการทำการทดลองอย่างลำเอียง

3. การควบคุม (Blocking หรือ Control) เป็นเทคนิคที่ใช้สำหรับเพิ่มความเที่ยงตรงแม่นยำ (Precision) ในการทดลอง โดยป้องกันการรบกวนจากปัจจัยภายนอก (Noise, Nuisance, Factors) และลดความผิดพลาดในการทดลอง โดยบล็อกเดียวกันหมายถึงการควบคุมสภาพในการทดลองให้มีสภาพใกล้เคียงกันมากที่สุด เช่น วัสดุที่ใช้ทดลองควรมีความเป็นอันหนึ่งอันเดียวกัน ใช้เครื่องจักรเครื่องเดียวกัน ผู้ทดลองคนเดียวกัน วิธีการทดลองเดียวกัน ในช่วงเวลาทดลองใกล้เคียงกัน โดยเปลี่ยนแปลงเฉพาะเงื่อนไขของปัจจัยที่สนใจศึกษาเท่านั้น

2.7.2.2. แนวทางในการออกแบบการทดลอง

การใช้วิธีการเชิงสถิติในการออกแบบและวิเคราะห์การทดลอง มีความจำเป็นอย่างยิ่งที่ทุกคนที่เกี่ยวข้องจะต้องมีความเข้าใจล่วงหน้าว่า เรากำลังศึกษาอะไรอยู่จะเก็บข้อมูลได้อย่างไรและจะวิเคราะห์ข้อมูลที่เก็บได้นั้นอย่างไร โดยมีขั้นตอนหลัก ๆ ดังนี้

1. การกำหนดปัญหา (Identify Problem) เป็นขั้นตอนที่ให้ทุกคนมีส่วนร่วมในการออกความคิดเห็นซึ่งอาจมีการทำงานเป็นทีมเพื่อปรึกษาหารือโดยการค้นคว้างานวิจัยที่ผ่านมา ไม่ว่าจะเป็นแผนกวิศวกรรม แผนกการผลิต แผนกการตลาด เป็นต้น และที่สำคัญผู้ที่มีส่วนร่วมในการออกแบบการทดลองจำเป็นต้องมีความชัดเจนในการกำหนดปัญหาซึ่งสามารถกำหนดได้โดยการระดมสมองจากผู้เชี่ยวชาญหลายสาขา

2. การเลือกปัจจัย และระดับของปัจจัย (Choice of Factor, Levels and Ranges) ผู้ทดลองต้องเลือกปัจจัยที่จะนำมาเปลี่ยนแปลงในระหว่างทำการทดลอง กำหนดขอบเขตที่ปัจจัยเหล่านี้จะเปลี่ยนแปลง และกำหนดระดับ (Level) ที่จะเกิดขึ้นในการทดลอง จะต้องพิจารณาด้วยว่าจะควบคุมปัจจัยเหล่านี้ ณ จุดที่กำหนดได้อย่างไร และจะวัดผลตอบได้อย่างไร ดังนั้น

ในกรณีเช่นนี้ผู้ทดลองจะต้องมีความรู้เกี่ยวกับกระบวนการอย่างมาก ซึ่งความรู้นี้อาจจะได้มาจากประสบการณ์และความรู้จากทางทฤษฎี มีความจำเป็นที่เราจะต้องตรวจสอบดูว่า ปัจจัยที่กำหนดขึ้นมานี้มีความสำคัญหรือไม่ และเมื่อวัตถุประสงค์ของการทดลองคือการกรองปัจจัย(Screening) ซึ่งต้องเลือกวิธีการคัดกรองปัจจัยให้เหมาะสมกับการทดลอง และควรที่จะกำหนดให้ระดับต่าง ๆ ที่ใช้ในการทดลองมีจำนวนน้อย ๆ การเลือกขอบเขตของการทดลองก็มีความสำคัญเช่นกัน ในการทดลองเพื่อกรองปัจจัยเราควรเลือกขอบเขตให้มีความกว้างมาก ๆ หมายถึงว่าขอบเขตที่ปัจจัยแต่ละตัวจะเปลี่ยนแปลงได้ควรมีค่ากว้าง ๆ และเมื่อเราได้เรียนรู้เพิ่มขึ้นว่า ตัวแปรใดมีความสำคัญและที่ระดับใดที่ทำให้เกิดผลลัพธ์ที่ดีที่สุด เราอาจจะลดขอบเขตให้แคบลงได้

3. การเลือกตัวแปรตอบสนอง (Selection of the Response Variable)

ในการเลือกตัวแปรตอบสนองผู้ทดลองควรจะแน่ใจว่าตัวแปรนี้จะให้ข้อมูลเกี่ยวกับกระบวนการที่กำลังศึกษาอยู่ บ่อยครั้งที่ค่าเฉลี่ยหรือส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (หรือทั้งคู่) ของกระบวนการจะเป็นตัวแปรตอบสนอง เป็นไปได้ว่าในการทดลองหนึ่งอาจมีตัวแปรตอบสนองหลายตัว และมีความจำเป็นอย่างมากที่เราจะต้องกำหนดให้ได้ว่า อะไรคือตัวแปรตอบสนอง และจะวัดตัวแปรเหล่านี้ได้อย่างไร ก่อนที่จะเริ่มดำเนินการทดลองจริง

4. การเลือกการออกแบบการทดลอง (Choice of Experimental Design)

ถ้ากิจกรรมการวางแผนก่อนการทดลองทำได้ถูกต้อง ขั้นตอนนี้จะง่ายขึ้นอย่างมาก การเลือกการออกแบบเกี่ยวข้องกับการพิจารณาขนาดของตัวอย่าง (จำนวนการทำซ้ำ) การเลือกลำดับที่เหมาะสมของการทดลองที่จะใช้ในการเก็บข้อมูล และการตัดสินใจว่าควรจะใช้วิธีบล็อกหรือการใช้แรนดอมไมเซชันอย่างใดอย่างหนึ่งหรือไม่ ในการเลือกการออกแบบ เราจำเป็นต้องคำนึงถึงวัตถุประสงค์ของการทดลองอยู่ตลอดเวลา ในการทดลองทางวิศวกรรมส่วนมากเราจะทราบตั้งแต่เริ่มต้นแล้วว่า ปัจจัยบางตัวจะมีผลต่อค่าตอบสนองที่เกิดขึ้น ดังนั้น เราจะหาว่าปัจจัยตัวใดที่ทำให้เกิดความแตกต่าง และประมาณขนาดของความแตกต่างที่เกิดขึ้น

5. การดำเนินการทดลอง (Performing the Experiment)

เมื่อดำเนินการทดลองเราจะต้องทำการทดลองอย่างระมัดระวัง เพื่อให้แน่ใจว่าการดำเนินการทุกอย่างเป็นไปตามการทดลองที่ได้ออกแบบไว้ ถ้ามีอะไรผิดพลาดเกิดขึ้นเกี่ยวกับการทดลองในขั้นตอนนี้จะทำให้การทดลองที่ทำนั้นใช้ไม่ได้ ดังนั้น การวางแผนในตอนแรกจะมีความสำคัญอย่างมากต่อความสำเร็จที่จะเกิดขึ้น

6. วิเคราะห์ข้อมูลเชิงสถิติ (Statistical Analysis of Data) ใช้วิธีการทางสถิติมาใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูล เพื่อว่าผลลัพธ์และข้อสรุปที่เกิดขึ้นจะเป็นตามวัตถุประสงค์ของการทดลอง ถ้าการทดลองได้ถูกออกแบบไว้เป็นอย่างดี และถ้าเราทำการทดลองตามที่ได้ออกแบบไว้ วิธีการทางสถิติที่จะนำมาใช้นั้นจะเป็นวิธีการที่ไม่ซับซ้อน ข้อได้เปรียบของวิธีการทางสถิติเป็นเครื่องช่วยในการตัดสินใจอย่างมีประสิทธิภาพ และถ้าเรานำเอาวิธีการทางสถิติมาผนวกกับความรู้ทางวิศวกรรม ความรู้เกี่ยวกับกระบวนการ จะทำให้ข้อสรุปที่ได้ออกมานั้นมีเหตุผลสนับสนุนและมีความน่าเชื่อถือ

7. ข้อสรุปและข้อเสนอแนะ (Conclusions and Recommendations) เมื่อเราได้วิเคราะห์ข้อมูลเรียบร้อยแล้ว ผู้ทดลองจะต้องหาข้อสรุปในทางปฏิบัติและแนะนำแนวทางการศึกษาต่อไป นอกจากนี้แล้วการทำการทดลองเพื่อยืนยันผล (confirmation testing) ควรจะทำการขึ้นเพื่อที่จะตรวจสอบความถูกต้องของข้อสรุปที่เกิดขึ้นอีกด้วย (ปารเมศ ชูติมา, 2545)

2.7.2.3. ประเภทของแผนการทดลอง

- กรณีปัจจัยเดียว (Single Factor)

1. แผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (Complete Randomized Design) ใช้กับการทดลองที่ปัจจัยที่ควบคุมไม่ได้มีขนาดไม่โตนัก โดยการทดลองจะทำโดยยึดหลักการทำแบบสุ่ม (Randomization) และการทำซ้ำ (Replication)

2. แผนการทดลองแบบบล็อกสุ่ม (Randomize Block Design) หลักการคือ การทดลองจะต้องทำการสุ่ม (Randomization) ทุกครั้ง และต้องทำซ้ำ (Replication) ทุกการทดลอง และต้องทำการบล็อก (Blocking) ปัจจัยรบกวน ซึ่งการบล็อกอาจจะทำมากกว่า 1 บล็อกก็ได้ขึ้นอยู่กับจำนวนของปัจจัยรบกวน

- กรณีหลายปัจจัย (Multi Factor)

1. แผนการทดลองแบบแฟกทอเรียล (Factorial Design) ใช้กับการทดลองที่มีปัจจัยตั้งแต่ 2 ปัจจัยขึ้นไป (Multi Factor Experiment) และเนื่องจากมีปัจจัยมากกว่า 1 ปัจจัย ดังนั้นนอกจากจะเกิดอิทธิพลของปัจจัยหลัก (Main Effect) ที่สนใจแล้ว ยังอาจเกิดอิทธิพลของปัจจัยร่วม (Interaction Effect) ได้ด้วย ซึ่งอิทธิพลของปัจจัยร่วม (Interaction Effect) คือ ผลที่เกิดขึ้นจากการที่ปัจจัยหนึ่งเปลี่ยนแปลงไป แล้วมีผลทำให้อิทธิพลของอีกปัจจัยหนึ่งเปลี่ยนแปลงด้วย รูปแบบของแผนการทดลองแบบแฟกทอเรียลที่สำคัญ ได้แก่ 2^k แฟกทอเรียล ใช้กับการทดลอง k

ปัจจัยที่กำหนดระดับของปัจจัยเพียงแค่ 2 ระดับ, 3^k แฟคทอเรียล ใช้กับการทดลอง k ปัจจัยที่กำหนดระดับของปัจจัยไว้ 3 ระดับ

2. แผนการทดลองแบบเศษส่วนเชิงแฟคทอเรียล (Fractional Factorial Design) เป็นการทดลองเฉพาะบางส่วนของซ้ำ

- แผนการทดลองประเภทอื่น ๆ

การออกแบบพื้นผิวผลตอบ (Response Surface Design) เป็นการออกแบบสำหรับการสร้างพื้นผิวผลตอบ โดยใช้ Response Surface Methodology (RMS) ซึ่งเป็นการรวบรวมเอาเทคนิคทางคณิตศาสตร์และทางสถิติที่มีประโยชน์ต่อการสร้างแบบจำลอง และการวิเคราะห์ปัญหาโดยที่ผลตอบที่เราสนใจขึ้นอยู่กับหลายตัวแปร และมีวัตถุประสงค์ที่จะหาค่าที่ดีที่สุดของผลตอบนี้

2.7.3 การออกแบบการทดลองแบบแฟรคชันนัลแฟคทอเรียล

การออกแบบการทดลองแบบแฟรคชันนัลแฟคทอเรียล (Fractional Factorial Design) ถูกนำมาใช้มากในการคัดกรองปัจจัย (factor screening) ที่ส่งผลกระทบต่อผลตอบสนองอย่างมีนัยสำคัญ ประยุกต์ใช้ในการออกแบบการทดลองที่มีปัจจัยจำนวนมาก ซึ่งจะทำให้จำนวนทรีทเมนต์คอมบิเนชัน (treatment combination) มีจำนวนมากด้วย มีผลต่อค่าใช้จ่ายและเวลาที่เพิ่มมากขึ้นจากการทดลองให้ครบทุกทรีทเมนต์คอมบิเนชันของการทดลองแฟคทอเรียล วิธีการออกแบบการทดลองแบบแฟรคชันนัลแฟคทอเรียลสามารถลดจำนวนทรีทเมนต์คอมบิเนชันได้โดยไม่มีผลกระทบต่อสรุปผล โดยวิธีนี้ใช้หลักการให้ความสำคัญกับอิทธิพลหลักและอิทธิพลของปัจจัยร่วมในระดับต่ำ คือ เมื่อมีปัจจัยจำนวนมาก ๆ เพื่อให้เห็นถึงความแตกต่างระหว่างตามตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 จำนวนทริทเมนต์คอมบิเนชันในการออกแบบการทดลองแบบ 2^k แฟคตอเรียล และ
การออกแบบการทดลองแบบแฟรคชันนัลแฟคตอเรียล

จำนวน ปัจจัย	อิทธิพลของปัจจัย หลักและปัจจัยร่วม	2^k แฟคตอเรียล	แฟรคชัน นัลแฟคตอเรียล	ความสามารถให้การลด จำนวนทริทเมนต์คอมบิเนชัน
4	10	16	12	25%
5	15	32	16	50%
6	21	64	32	50%
7	28	128	32	75%

(Anderson and Whitcomb, 2550)

จากตารางที่ 2.5 จะเห็นได้ว่าจำนวนปัจจัยเพิ่มมากขึ้น จำนวนทริทเมนต์คอมบิเนชันก็มีจำนวนมากขึ้นเช่นกันในการออกแบบ 2^k แฟคตอเรียล การให้ความสำคัญกับอิทธิพลของปัจจัยหลัก และอิทธิพลของปัจจัยร่วมระหว่างสองปัจจัย (two-factor interaction effect) จะสามารถลดจำนวนทริทเมนต์คอมบิเนชันที่มีความสำคัญน้อยลงไปได้

การออกแบบการทดลองแบบแฟรคชันนัลแฟคตอเรียลแบ่งออกเป็น 3 รูปแบบด้วยกันคือ การออกแบบการทดลองแบบแฟรคชัน $1/2$ ของ 2^k แฟคตอเรียล (The One-Half Fraction of The 2^k Design หรือ 2^{k-1} Factorial Design) การออกแบบการทดลองแบบแฟรคชัน $1/4$ ของ 2^k แฟคตอเรียล (The One-Quarter Fraction of The 2^k Design หรือ 2^{k-2} Factorial Design) และการออกแบบการทดลองแบบแฟรคชัน $1/8$ ของ 2^k แฟคตอเรียล (The One-Eighth Fraction of The 2^k Design หรือ 2^{k-3} Factorial Design) เมื่อปัจจัยมีอยู่ 3-5 ตัว อาจจะสามารถใช้วิธีการออกแบบการทดลองแบบแฟรคชัน $1/2$ ของ 2^k แฟคตอเรียลได้ แต่ถ้าจำนวนปัจจัยเพิ่มมากขึ้นก็ส่งผลต่อจำนวนทริทเมนต์คอมบิเนชันเพิ่มมากขึ้น ทำให้ยากต่อการทดลอง ควรคำนึงถึงจำนวนทริทเมนต์คอมบิเนชันที่เหมาะสม ดังแสดงในตารางที่ 2.6

ตารางที่ 2.6 จำนวนทริทเมนต์คอมบินเนชันในการออกแบบการทดลองแบบแฟรคชัน
นัลแฟกตอเรียล

จำนวนปัจจัย	2^k	2^{k-1}	2^{k-2}	2^{k-3}
	แฟกตอเรียล	แฟกตอเรียล	แฟกตอเรียล	แฟกตอเรียล
3	8	4	N/A	N/A
4	16	8	N/A	N/A
5	32	16	8	N/A
6	64	32	16	8
7	128	64	32	16
8	256	128	64	32
9	512	256	128	64

1. มิติของการออกแบบ

เราเรียกการออกแบบ 2^{3-1} ดังกล่าวว่าการออกแบบมิติ III (Resolution III Design) ในการออกแบบเช่นนี้ ผลของปัจจัยหลักจะเป็นคู่แฝงกับปัจจัยรวม 2 ปัจจัย การออกแบบจะมีมิติ R ก็ต่อเมื่อไม่มีผลของ p ปัจจัยใด ๆ ที่แฝงอยู่กับผลอื่น ๆ ที่น้อยกว่า $R - p$ ปัจจัย เราจะใช้ตัวห้อยเป็นเลขโรมันแทนมิติของการออกแบบ ดังนั้น เศษส่วนของการออกแบบ 2^3 ที่มีตัวกำหนดความสัมพันธ์ $I = ABC$ (หรือ $I = -ABC$) คือการออกแบบ 2^{3-1}_{III}

เนื่องจากการออกแบบที่มีมิติ III, IV และ V มีความสำคัญ เราจะให้นิยามและยกตัวอย่างสำหรับการออกแบบเหล่านี้ได้ดังต่อไปนี้

1. การออกแบบมิติ III (Resolution III) การออกแบบเหล่านี้จะไม่มีปัจจัยหลักใด ๆ ที่จะแฝงอยู่กับปัจจัยหลักตัวอื่น ๆ แต่ปัจจัยหลักจะถูกแฝงอยู่กับปัจจัยรวมสองปัจจัย และอาจจะมีปัจจัยรวมสองปัจจัยที่แฝงอยู่ด้วยกัน ตัวอย่างเช่น การออกแบบ 2^{3-1} ที่แสดงในตารางที่ 2.9 เป็นการออกแบบที่มีมิติ III (2^{3-1}_{III})

2. การออกแบบมิติ IV (Resolution IV) การออกแบบเหล่านี้จะไม่มีปัจจัยหลักใด ๆ ที่จะแฝงอยู่กับปัจจัยหลักตัวอื่น ๆ หรือปัจจัยรวมสองปัจจัย แต่จะมีปัจจัยรวมสองปัจจัยที่แฝงอยู่ด้วยกัน ตัวอย่าง เช่น การออกแบบ 2^{4-1} ที่มี $I = ABCD$ เป็นการออกแบบที่มีมิติ IV 2^{4-1}_{IV}

3. การออกแบบมิติ V (Resolution V) การออกแบบเหล่านี้จะไม่มีปัจจัยหลักหรือปัจจัยร่วมสองปัจจัยใด ๆ ที่จะแฝงอยู่กับปัจจัยหลักหรือปัจจัยร่วมสองปัจจัยตัวอื่น ๆ แต่ปัจจัยร่วมสองปัจจัยจะแฝงอยู่กับปัจจัยร่วมสามปัจจัย ตัวอย่างเช่น การออกแบบ 2^{5-1} ที่มี $I = ABCDE$ เป็นการออกแบบที่มีมิติ V 2^{5-1}

Resolution คือ ระดับความละเอียดในผลลัพธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์ หาได้จากความยาว Aliases ที่สั้นที่สุดจาก Defining Relation ตามปกติแล้วการออกแบบเศษส่วนเชิงแฟคตอเรียลแบบสองระดับจะเป็นจำนวนตัวอักษรที่น้อยที่สุดในเวิร์ดของตัวกำหนดความสัมพันธ์ สิ่งที่มาคือ เราสามารถเรียกการออกแบบต่อจากนี้ว่า การออกแบบชนิดสามตัวอักษร สี่ตัวอักษร และห้าตัวอักษร ตามลำดับ โดยมากแล้วเรามักจะกำหนดให้มีมิติสูงสุดที่เป็นไปได้ของการออกแบบแฟคชันนัลแฟคตอเรียลที่มีค่าตรงกันกับระดับของเศษส่วนที่ต้องการ ซึ่งจะเห็นได้ว่าการออกแบบยังมีมิติสูง ก็ยังมีข้อจำกัดน้อยลงในเรื่องสมมุติฐานเกี่ยวกับว่า ปัจจัยร่วมตัวใดจะถูกละเอียดได้เพื่อที่จะได้มาซึ่งการตีความหมายข้อมูลอย่างถูกต้อง

2. การออกแบบการทดลองแบบแฟคชัน 1/8 ของ 2^k แฟคตอเรียล

แฟคชันนัลแฟคตอเรียล 2^{k-p} คือการออกแบบการทดลองที่ประกอบด้วยทริทเมนต์บนชั้น 2^{k-p} ซึ่งเป็นจำนวน $1/2^p$ เท่าของ 2^k นั่นคือ ถ้า $p = 3$ จะได้การออกแบบการทดลอง 1/8 ของ 2^k แฟคตอเรียล สร้างแฟคชัน (generator) เป็นจำนวน p ตัวที่เป็นอิสระต่อกัน โดยใช้ความสัมพันธ์แสดงนิยาม (defining relation) จากตัวแฟคชัน (generator) เป็นจำนวน p ตัวและจาก generalized interactions ระหว่างตัวสร้างแฟคชันเป็นจำนวน $2^p - p - 1$ ตัว แล้วทำการคูณกับปัจจัยแต่ละตัว ซึ่งในการสร้างแฟคชันก็คือ การเลือกตัวสร้างแฟคชันที่ทำให้เกิด resolution สูงสุด เช่น แฟคชันนัลแฟคตอเรียล 2^{7-3} ที่มีตัวสร้างแฟคชัน 3 ตัว และ generalized interactions ระหว่างตัวสร้างแฟคชันเป็นจำนวน $2^3 - 3 - 1 = 6$ ตัว ถ้าเลือก $E=ABC$, $F=BCD$, $G=ABD$ จะ ได้ ความสัมพันธ์แสดงนิยาม (Defining Relation) เป็น $I=BCE=BCDF=ABDG=ADEF=CDEG=ACFG=BEFG$ ซึ่งเป็นการออกแบบมิติ IV จะได้ผลการออกแบบการทดลองแบบแฟคชันนัลแฟคตอเรียล 2^{7-3} ดังแสดงในตารางที่ 2.7

- ค่าอิทธิพลปัจจัยหลักและค่าอิทธิพลปัจจัยร่วม โดยพิจารณาจาก Contrast coefficients

$$\text{Contrast}_{AB...K} = (a \pm 1)(b \pm 1) \dots (k \pm 1) \quad (2.4)$$

- ค่าประมาณผลกระทบของแฟคชันนัลแฟคตอเรียลรูปแบบทั่วไปสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$\text{Effect estimate}_{AB...K} = I_{AB...K} = \frac{2}{n2^{k-p}} (\text{Contrast}_{AB...K}) \quad (2.5)$$

- ค่าผลรวมกำลังสองของแฟรคชันนัลแฟกตอเรียลรูปแบบทั่วไปสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$SS_{AB...K} = \frac{2}{n2^{k-p}} (\text{Contrast}_{AB...K})^2 \quad (2.6)$$

โดยที่ n คือ จำนวนทำซ้ำ (Replication)

ตารางที่ 2.7 ได้ผลการออกแบบการทดลองแบบแฟรคชันนัลแฟกตอเรียล 2^{7-3}

Run	A	B	C	D	E=ABC	F=BCD	G=ABD
1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	-1	1	-1	-1
3	1	1	-1	1	-1	-1	1
4	1	1	-1	-1	-1	1	-1
5	1	-1	1	1	-1	-1	-1
6	1	-1	1	-1	-1	1	1
7	1	-1	-1	1	1	1	-1
8	1	-1	-1	-1	1	-1	1
9	-1	1	1	1	-1	1	-1
10	-1	1	1	-1	-1	-1	1
11	-1	1	-1	1	1	-1	-1
12	-1	1	-1	-1	1	1	1
13	-1	-1	1	1	1	-1	1
14	-1	-1	1	-1	1	1	-1
15	-1	-1	-1	1	-1	1	1
16	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1

สาเหตุของการเลือก $E = ABC, F = BCD, G = ABD$ จะเป็น $E = AB, F = BC, G = CD$ เนื่องจากว่า Interaction ระดับที่สูงกว่ามีโอกาสมีนัยสำคัญทางสถิติมากกว่า Interaction ระดับที่ต่ำกว่า หมายถึง Interaction ของ 3 Main Effect ย่อมมีโอกาสมีนัยสำคัญทางสถิติมากกว่า Interaction ของ 2 Main Effect เมื่อทำการวิเคราะห์โอกาสตีความ Confounding ก็จะพิดน้อยลง จึงเลือก 3 Main Effect แทนตัว Factor ที่เหลือ ถ้าเหตุผลเป็นเช่นนี้ก็ควรเลือกใช้ 4 Main Effect แทนน่าจะดีที่สุด แต่ที่ไม่ใช่เพราะ 4 Main Effect ในการออกแบบด้วยวิธี 2^{7-3} มีเพียง 1 เดียวเท่านั้นไม่พอที่จะแทนใน 3 Main Effect ที่เหลือได้ โดยข้อกำหนดพื้นฐาน คือ ใช้ระดับ Interaction เดียวกันแทน Main Effects ที่เหลือทุกตัว

เลือก $E = ABC, F = BCD, G = ABD$ ในการออกแบบ ถ้าเอาตัว Main Effect คู่ทั้งสองด้านจะได้ $EE = I = ABCE, FF = I = BCDF, GG = I = ABDG$ จะได้ความสัมพันธ์แสดงนิยาม (Defining Relation) 3 ตัวแรก

เมื่อนำ Defining Relation มาคูณกันเอง ทีละคู่และคูณกันเองทั้งหมดจะได้เป็น

$$I^2 = ABCE(BCDF) \text{ จะได้เป็น } I = AB^2C^2DEF \text{ หรือ } I = ADEF$$

$$I^2 = ABCE(ABDG) \text{ จะได้เป็น } I = A^2B^2CDEG \text{ หรือ } I = CDEG$$

$$I^2 = ABDG(BCDF) \text{ จะได้เป็น } I = AB^2CD^2FG \text{ หรือ } I = ACFG$$

$$I^3 = ABCE(ABDG)(BCDF) \text{ จะได้เป็น } I = A^2B^3C^2D^2EFG \text{ หรือ } I = BEFG$$

ความสัมพันธ์แสดงนิยาม (Defining Relation) คือ $I = ABCE = BCDF = ABDG = ADEF = CDEG = ACFG = BEFG$ และสามารถหาชื่อแฝง (Aliases) ทั้งหมดได้โดยการคูณอิทธิพลของปัจจัย (Factorial Effect) ด้วยความสัมพันธ์แสดงนิยาม (Defining Relation) ตัวอย่างเช่น

ชื่อแฝงของ A ได้ดังนี้

$$A(I) = A(ABCE) = A(BCDF) = A(ABDG) = A(ADEF) = A(CDEG) = A(ACFG) = A(BEFG)$$

ชื่อแฝงของปัจจัยร่วมระหว่าง ABD ได้ดังนี้

$$ABD(I) = ABD(ABCE) = ABD(BCDF) = ABD(ABDG) = ABD(ADEF) = ABD(CDEG) = ABD(ACFG) = ABD(BEFG)$$

$$ABD = DCE = ACF = G = BEF = BCEG = BCDFG = ADEFG$$

2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

สำหรับเนื้อหาที่เกี่ยวข้องกับการวิจัยครั้งนี้ทางผู้วิจัยได้รวบรวมข้อมูลวารสารทางวิชาการที่มีการตีพิมพ์เผยแพร่ในระดับชาติและนานาชาติ ซึ่งวารสารเหล่านี้จะช่วยทำให้ข้อมูลในวิทยานิพนธ์เล่มนี้มีความสมบูรณ์และความถูกต้อง ทำให้ผู้สนใจศึกษามีความเข้าใจเกี่ยวกับการวิจัยครั้งนี้ โดยมีเนื้อหาที่เกี่ยวข้องประกอบด้วย งานวิจัยทางด้านการหล่ออลูมิเนียมหล่อแบบกึ่งของแข็ง GISS ความหยาบผิวของอลูมิเนียม และการสึกหรอของเครื่องมือตัด ซึ่งอธิบายรายละเอียดดังต่อไปนี้

สิริพร และคณะ (2009) ได้ทำการศึกษาอิทธิพลของตัวแปรในกระบวนการทางความร้อนที่มีผลต่อสมบัติทางกลและโครงสร้างจุลภาคของอลูมิเนียมหล่อแบบกึ่งของแข็ง A356 โดยกระบวนการที่ใช้ในการเตรียมอลูมิเนียมหล่อแบบกึ่งของแข็ง คือ GISS (Gas Induce Semi-Solid) และกระบวนการทางความร้อนที่ใช้คือ T5 และ T6 พบว่า กระบวนการทางความร้อนแบบ T6 ให้ค่าความแข็งสูงที่สุดที่ 149.90 HV ที่ผ่านการอบละลายที่อุณหภูมิ 540 °C เป็นระยะเวลา 8 ชั่วโมง และบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 135°C เป็นระยะเวลา 12 ชั่วโมงและมีความต้านทานแรงดึงสูงสุดที่ 297.07MPaและมีเปอร์เซ็นต์การยืดตัวมีค่าเท่ากับ 9.66% ซึ่งถือว่าเป็นเพิ่มทางเลือกให้กับผู้ผลิตชิ้นส่วน[6]

ตารางที่ 2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับความหยาบผิวของอลูมิเนียม

ผู้วิจัย	ปี	ขอบเขตในการวิจัย	ผลการวิจัย
Surasit et al.	2013	<ul style="list-style-type: none"> - อลูมิเนียมหล่อกึ่งของแข็ง - กระบวนการกัดปาดผิวหน้า - เม็ดมีดคาร์ไบด์ - การออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียล 2^k - ความเร็วรอบ, อัตราป้อน, ความลึกในการตัดไม่เกิน 1 มม. - ชิ้นงานขนาด 100x100x35 ลบ.มม. 	<p>- ปัจจัยที่มีผลต่อความหยาบผิว คือ อัตราป้อน และความเร็วรอบ ในขณะที่ความลึกของการตัดไม่มีผลต่อความหยาบผิว ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าความหยาบผิวมีแนวโน้มที่จะลดลงเมื่อใช้ความเร็วรอบ 4,200 รอบ/นาที และอัตราป้อน 1,300 มม./นาที</p>

ตารางที่ 2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับความหยาบผิวของอลูมิเนียม (ต่อ)

ผู้วิจัย	ปี	ขอบเขตในการวิจัย	ผลการวิจัย
Surasit et al.	2013	<ul style="list-style-type: none"> - อลูมิเนียมหล่อทิ้งของแข็งเกรด 2024 - กระบวนการกัดปาดผิวหน้า - เม็ดมีดคาร์ไบด์ - การออกแบบการทดลองแบบ แฟกทอเรียล 2^k - ความเร็วรอบ, อัตราป้อน, ความลึกในการตัดไม่เกิน 1 มม. 	<p>- ปัจจัยที่มีผลต่อความหยาบผิว คือ อัตราป้อน และความเร็วตัด ในขณะที่ความลึกของการตัด ไม่มีผลต่อความหยาบผิว ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าพื้นความหยาบของผิวมีแนวโน้มที่จะลดลงเมื่อใช้ความเร็วรอบ 3,600 รอบ/นาที และอัตราป้อน 1,000 มม./นาที</p>
Surasit et al. [18]	2014	<ul style="list-style-type: none"> - อลูมิเนียมหล่อทิ้งของแข็งเกรด AA 7075 - กระบวนการกัดปาดผิวหน้า - เม็ดมีดคาร์ไบด์ - การออกแบบการทดลองแบบ แฟกทอเรียล 2^k - ความเร็วรอบ, อัตราป้อน, ความลึกในการตัดไม่เกิน 1 มม. 	<p>- ปัจจัยที่มีผลต่อความหยาบผิว คืออัตราป้อน และความเร็วตัด ในขณะที่ความลึกของการตัด ไม่มีผลต่อความหยาบผิว ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าพื้นความหยาบของผิวมีแนวโน้มที่จะลดลงเมื่อใช้ความเร็วรอบ 3,800 รอบ/นาที และอัตราป้อน 1,000 มม./นาที</p> <p>- รูปแบบของการสึกหรอของเครื่องมือตัดคล้ายกับการแตกหัก ที่เกิดจากความล้า อาจจะเป็นเพราะว่าเกิดตรงปลายของเครื่องมือตัด หรือผลกระทบจากความต้านทานการสึกหรอน้อย</p>

ตารางที่ 2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับความหยาบผิวของอลูมิเนียม (ต่อ)

ผู้วิจัย	ปี	ขอบเขตในการวิจัย	ผลการวิจัย
M. Subramanian et al.	2014	<ul style="list-style-type: none"> - อลูมิเนียมเกรด Al 7075-T6 - high-speed steel end mill - ความเร็วตัดเฉือน - อัตราป้อน - ความลึกในการตัด - มุมคายเศษ - nose radius 	<ul style="list-style-type: none"> - ผลการทดลองพบว่าค่าที่เหมาะสมที่สุดเพื่อให้ค่าความหยาบน้อยที่สุดคือ เช่น มุมคายเศษ = 12° nose radius = 0.8 มม. ความเร็วตัดเฉือน 115 ม./นาที อัตราป้อน 0.04 มม./ฟัน ความลึกในการตัด 2 มม.
Elias et al.	2016	<ul style="list-style-type: none"> - อลูมิเนียมเกรด 5083 - Carbide end mill \varnothing 12 มม. - การออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียล 3^k - ความเร็วตัดเฉือน - อัตราป้อน - ความลึกในการตัดไม่เกิน 1.5 มม. 	<ul style="list-style-type: none"> - ปัจจัยที่มีผลต่อความหยาบผิวคืออัตราป้อน และความเร็วตัดเฉือน ในขณะที่ความลึกของการตัดไม่มีผลต่อความหยาบผิว ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าพื้นความหยาบของผิวมีแนวโน้มที่จะลดลงเมื่อใช้ความเร็วตัดเฉือน 300 ม./นาที และอัตราป้อน 100 มม./นาที

ตารางที่ 2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการสึกหรอของเครื่องมือตัด

ผู้วิจัย	ปี	ขอบเขตในการวิจัย	ผลการวิจัย
M. Anthony Xavier et al.	2009	<ul style="list-style-type: none"> - AISI 304 - เม็ดมิลคาร์ไบด์ - การทดลองโดยวิธีการ Taguchi - ความเร็วตัดเฉือน - ความลึกในการตัดในแนวแกน - อัตราป้อน - สารหล่อเย็น 	- ปัจจัยความเร็วตัดเฉือนมีผลต่อการสึกหรอของเครื่องมือตัดที่เพิ่มมากขึ้น (46.49% contribution) และปัจจัยอัตราป้อนมีผลต่อการสึกหรอของเครื่องมือตัดที่เพิ่มมากขึ้น (38.73% contribution)
P.S. SIVASAKTHIVEL et al.	2010	<ul style="list-style-type: none"> - อลูมิเนียมเกรด Al 6063 - HSS end mill cutter - การออกแบบการทดลองแบบส่วนผสมกลาง (CCD) - มุมเกลียว - ความเร็วรอบ - อัตราป้อน - ความลึกในการตัดในแนวแกน - ความลึกในการตัดแนวรัศมี 	- ปัจจัยที่มีผลต่อการสึกหรอของเครื่องมือตัด คือ มุมเกลียว ความเร็วรอบ ความลึกในการตัดในแนวแกน และ ความลึกในการตัดในแนวรัศมี ส่วนปัจจัยร่วมที่มีผลต่อการสึกหรอของเครื่องมือตัด คือ มุมเกลียวกับ ความลึกในการตัดในแนวแกนความเร็วรอบกับอัตราป้อน มุมเกลียวกับอัตราป้อน ความเร็วรอบกับความลึกในการตัดในแนวรัศมี

ตารางที่ 2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการสึกหรอของเครื่องมือตัด (ต่อ)

ผู้วิจัย	ปี	ขอบเขตในการวิจัย	ผลการวิจัย
Hamdi Aouici et al.	2011	<ul style="list-style-type: none"> - AISI H11 - กระบวนการกลึง - เม็ดมีด CBN7020 - การทดลองโดยวิธีการพื้นผิวตอบสนอง (RSM) - ความเร็วตัดเฉือน - อัตราป้อน - เวลาในการตัดเฉือน 	<p>- ปัจจัยที่มีผลต่อการสึกหรอของเครื่องมือตัด คือ ความเร็วตัดเฉือน และเวลาในการตัดเฉือน ส่วนปัจจัยร่วมที่มีผลต่อการสึกหรอของเครื่องมือตัด คือ ความเร็วตัดเฉือนกับเวลาในการตัดเฉือน</p>
R. Arokiadass et al.	2012	<ul style="list-style-type: none"> - LM25 Al alloy - Flat end uncoated solid carbide cutter Ø 12 มม. - การออกแบบการทดลองแบบส่วนผสมกลาง (CCD) - ความเร็วรอบ - อัตราป้อน - ความลึกในการตัดในแนวแกน - Silicon Carbide (%wt) 	<p>- ปัจจัยที่มีผลต่อการสึกหรอของเครื่องมือตัด คือ ความเร็วรอบ อัตราป้อน และ Silicon Carbide (%wt) ส่วนปัจจัยร่วมที่มีผลต่อการสึกหรอของเครื่องมือตัด คือ ความเร็วรอบกับอัตราป้อน</p>

บทที่ 3

วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการดำเนินการวิจัย

วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการดำเนินการวิจัย เพื่อคัดกรองปัจจัยที่มีอิทธิพลหลักต่อความหยาบผิวและการสึกหรอของเครื่องมือตัดในกระบวนการกัดวัสดุอลูมิเนียมหล่อแบบกึ่งของแข็ง A356 รายละเอียดในบทนี้จึงประกอบด้วย

- 1) วัสดุ และอุปกรณ์
- 2) วิธีการดำเนินการวิจัย

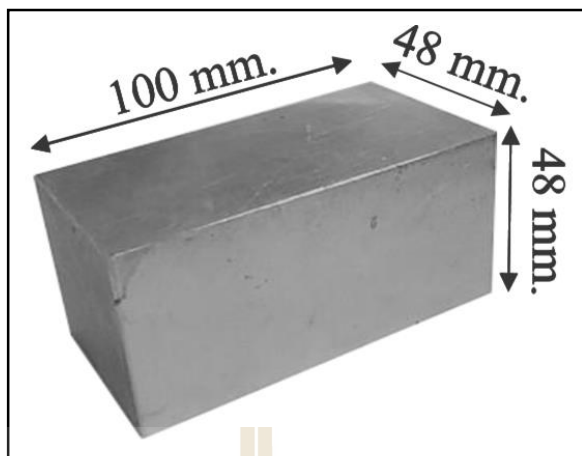
3.1 วัสดุและอุปกรณ์

3.1.1 วัสดุที่ใช้ในการวิจัย

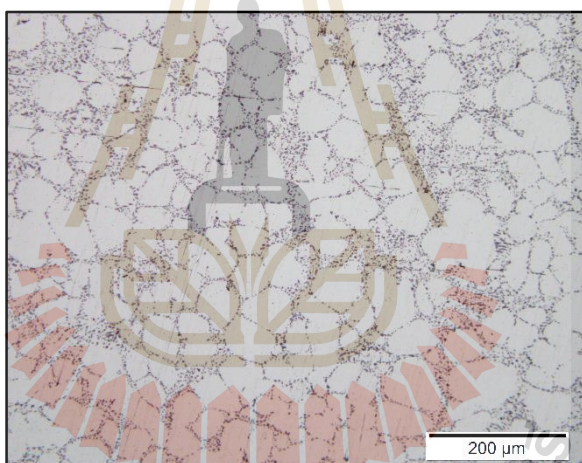
- วัสดุชิ้นงาน คือ อลูมิเนียมหล่อแบบกึ่งของแข็งหมายเลข A356 มีค่าความแข็ง 115.22 HV มีส่วนผสมทางเคมีดังตารางที่ 3.1 มีขนาดวัสดุชิ้นงานก่อนทำการทดลอง 48 x 100 x 48 มิลลิเมตร (ความกว้าง x ความยาว x ความสูง) ดังแสดงในรูปที่ 3.1 และมีโครงสร้างจุลภาค ดังแสดงในรูปที่ 3.2

ตารางที่ 3.1 ส่วนผสมทางเคมีของอลูมิเนียมหล่อแบบกึ่งของแข็งหมายเลข A356 ที่ใช้ในการทดลอง

Alloy	Si	Mg	Fe	Cu	Mn	Zn	Ti	Al
A356	7.18	0.215	0.108	0.0197	0.0045	0.0089	0.112	Bal.



รูปที่ 3.1 ขนาดวัสดุชิ้นงานก่อนทำการทดลอง



รูปที่ 3.2 โครงสร้างจุลภาคของอลูมิเนียมหล่อแบบกึ่งของแข็งหมายเลข A356

ผลการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของอลูมิเนียมหล่อแบบกึ่งของแข็งหมายเลข A356 มีลักษณะโครงสร้างจุลภาคที่ประกอบด้วย โครงสร้างแบบก้อนกลม (Globular structure) โดยประกอบด้วยเนื้อเมตริกซ์ คือ เฟส α -Al (บริเวณสีขาว) และเฟสยูเทคติกซิลิกอน คือ บริเวณที่มีรูปร่างเป็นแผ่นเล็ก ๆ กระจายตามขอบเกรนของเฟส α -Al

- เครื่องมือตัด คือ ดอกกัดเอ็นมิลล์ (End mill) ที่ผลิตมาจากบริษัท ARNO วัสดุที่ใช้ขึ้นรูปเป็นคาร์ไบด์ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 มิลลิเมตร ความยาวของคมตัด 20 มิลลิเมตร และความยาวดอกทั้งหมด 74 มิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 ดอกกัดเอ็นมิลล์ (End mill)

3.1.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย

ก. อุปกรณ์สำหรับการตรวจสอบคุณสมบัติทางกลของวัสดุ

- เครื่องขัดผิวชิ้นงานแบบจานหมุน ยี่ห้อ BUEHLER รุ่น ECOMET 6 ดังแสดงในรูปที่ 3.4 เป็นเครื่องสำหรับการขัดหยาบและขัดละเอียดผิวชิ้นงานก่อนเข้าสู่กระบวนการทดสอบค่าความแข็ง ทดสอบส่วนผสมทางเคมี และส่องโครงสร้างจุลภาคของวัสดุ



รูปที่ 3.4 เครื่องขัดผิวชิ้นงานแบบจานหมุน

- Micro Vickers เป็นเครื่องสำหรับวัดทดสอบค่าความแข็งของวัสดุ ดังแสดงในรูปที่ 3.5 โดยการใช้หัวกดเพชรรูปปิรามิดฐานสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาดเล็ก กดลงไปผิววัสดุด้วยน้ำหนักกดคงที่ 100 กรัม กดเป็นเวลา 10 วินาที ซึ่งค่าความแข็งที่ได้คิดจากน้ำหนักกดที่กระทำต่อพื้นที่ของรอยกด



รูปที่ 3.5 Micro Vicker

- Spectrometer เป็นเครื่องสำหรับวัดทดสอบส่วนผสมทางเคมีของวัสดุ ดังแสดงในรูปที่ 3.6 โดยการยิงลำแสงจากแหล่งกำเนิดผ่านเกรตติง ไปสู่วัสดุชิ้นงาน และทำการวิเคราะห์สเปกตรัม เพื่อทำการระบุชนิดของสาร โดยได้จากผลการวัดความเข้มแสงที่แตกต่าง ความยาวคลื่นของแสงและสัดส่วนของพลังงานโฟตอน



รูปที่ 3.6 Spectrometer

ข. อุปกรณ์สำหรับการปฏิบัติการตัดเฉือน

- เครื่องกัดซีเอ็นซี ยี่ห้อ Bridgeport รุ่น VMC-500 16 เป็นเครื่องกัดสำหรับใช้ในการแปรรูปวัสดุหรือผลิตชิ้นงาน ดังแสดงในรูปที่ 3.7 ซึ่งใช้คอมพิวเตอร์เข้ามาควบคุมการทำงาน โดยวิธีการเขียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์หรือเรียกว่า โปรแกรมเอ็นซี ให้เครื่องทำงานตามที่โปรแกรมไว้ (ความเร็วรอบสูงสุดที่ 8,000 รอบ/นาที และอัตราป้อนสูงสุดที่ 10,000 มิลลิเมตร/นาที)



รูปที่ 3.7 เครื่องกัดซีเอ็นซี

ค. อุปกรณ์สำหรับการวัดค่าความหยาบผิว

- เครื่องวัดความหยาบผิว ยี่ห้อ MITUTOYO รุ่น Surf Test SJ-210 เป็นเครื่องอิเล็กทรอนิกส์สำหรับทดสอบวัดค่าความหยาบผิวชิ้นงาน ดังแสดงในรูปที่ 3.8 โดยหัวโพรบ (Probe) ที่ปลายหัววัดเคลื่อนที่บนผิวชิ้นงานที่ต้องการวัด ซึ่งความยาวระยะวัดก็จะขึ้นกับมาตรฐานที่ใช้ด้วย เช่น ISO 4287 : 1997 (ยุโรป), ANSI/ASME B 46.1-1995 (อเมริกา) และ JIS B 0601-1994 (ญี่ปุ่น) เป็นต้น ซึ่งในการวิจัยทำการทดสอบวัดค่าความหยาบผิวเฉลี่ยเลขคณิต (Roughness average : Ra) เป็นค่าที่นิยมใช้กันมากที่สุด มีหน่วยวัดเป็นไมโครเมตร (μm)



รูปที่ 3.8 เครื่องวัดความหยาบผิว

ง. อุปกรณ์สำหรับการวัดการสึกหรอของเครื่องมือตัด

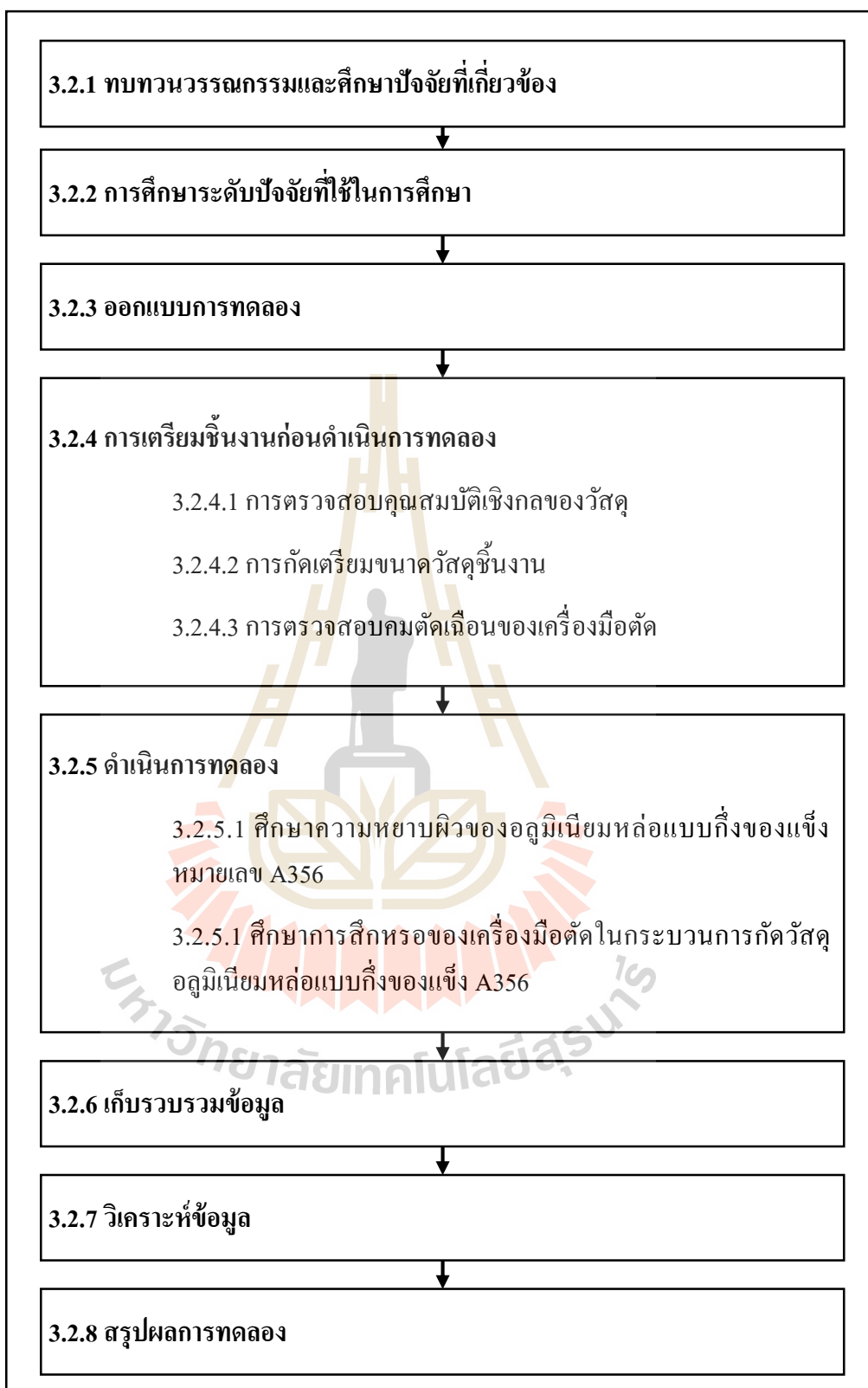
- Optical Microscope ยี่ห้อ OLYMPUS เป็นกล้องจุลทรรศน์แบบส่องแสงสำหรับขยายภาพ ดังแสดงในรูปที่ 3.9 โดยการสะท้อนแสงจากวัตถุเข้าสู่เลนส์ ซึ่งมีกำลังขยายต่าง ๆ (เลนส์ใกล้ตัวมีกำลังขยายที่ 10 เท่า และเลนส์ใกล้วัตถุมีกำลังขยายที่ 5 เท่า, 10 เท่า, 20 เท่า, 50 เท่า และ 100 เท่า)



รูปที่ 3.9 Optical Microscope

3.2 วิธีการดำเนินการวิจัย

วิธีการดำเนินการวิจัยครั้งนี้ มีหลายขั้นตอน โดยเริ่มต้นจากการศึกษาปัจจัยที่เกี่ยวข้อง แล้วทำการกำหนดปัจจัยและผลตอบแทน จากนั้นทำการออกแบบการทดลอง ก่อนการดำเนินการทดลอง ต้องทำการตรวจสอบคุณสมบัติทางกลของวัสดุที่นำมาวิจัยครั้งนี้ ตรวจสอบค่าความแข็ง ตรวจสอบส่วนผสมทางเคมี และตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค ทั้งนี้ เพื่อตรวจสอบว่าวัสดุที่นำมาวิจัยตรงตามมาตรฐานที่กำหนดไว้หรือไม่ จากนั้นทำการเตรียมชิ้นงานก่อนดำเนินการทดลอง เมื่อเตรียมชิ้นงานเสร็จ จึงทำการดำเนินการทดลองกระบวนการกัด เพื่อทำการวัดค่าความหยาบผิว ด้วยเครื่องวัดความหยาบผิวและวัดขนาดการสึกหรอของเครื่องมือตัดด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องแสง หลังจากนั้นนำข้อมูลที่ได้ไปวิเคราะห์ผลและสรุปผล เพื่อให้เข้าใจถึงขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยในครั้งนี้ ผู้วิจัยได้ทำการสร้างแผนภาพขั้นตอนการดำเนินงานทั้งหมดดังรูปที่ 3.10 ซึ่งมีการอธิบายรายละเอียดในแต่ละขั้นตอนดังต่อไปนี้



รูปที่ 3.10 ขั้นตอนการดำเนินงาน

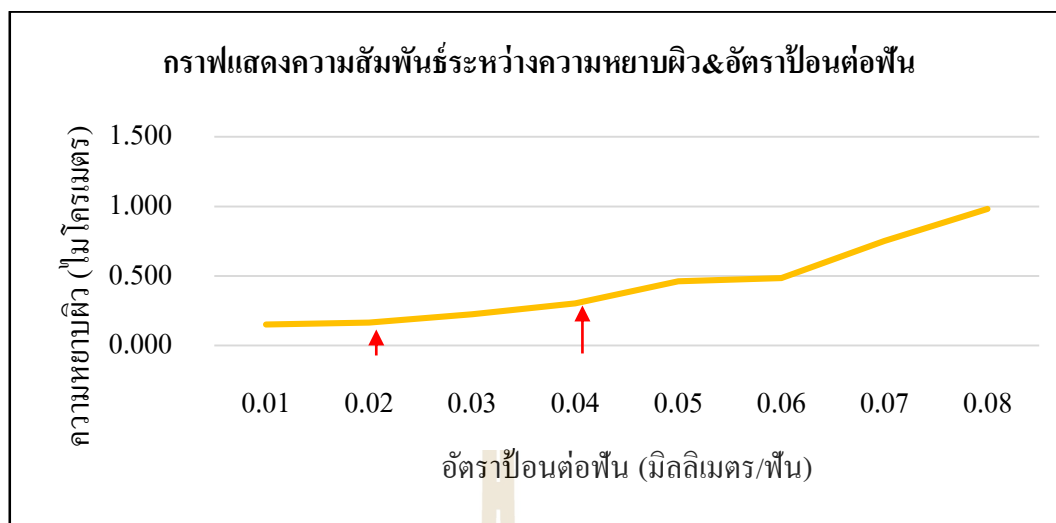
3.2.1 ทบทวนวรรณกรรม และศึกษาปัจจัยที่เกี่ยวข้อง

การศึกษาค้นคว้าองค์ความรู้ ทฤษฎี และเอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการกัดและปัจจัยที่มีอิทธิพลหลักที่คาดว่าจะส่งผลกระทบต่อความหยาบผิวและการสึกหรอของเครื่องมือตัด พบว่า ปัจจัยหลักที่คาดว่าจะมีผลต่อความหยาบผิวและการสึกหรอของเครื่องมือตัด มีทั้งหมด 7 ปัจจัย ประกอบด้วยปัจจัยในการตัดเฉือน 4 ปัจจัย ได้แก่ อัตราป้อนต่อฟัน ความเร็วรอบ ความลึกของการตัดในแนวรัศมี ความลึกของการตัดในแนวแกน และปัจจัยที่เกี่ยวกับรูปร่างของเครื่องมือตัด 3 ปัจจัย ได้แก่ จำนวนฟันของดอกกัด มุมเกลียว และมุมคายเศษ

3.2.2 การศึกษาระดับปัจจัยที่ใช้ในการศึกษา

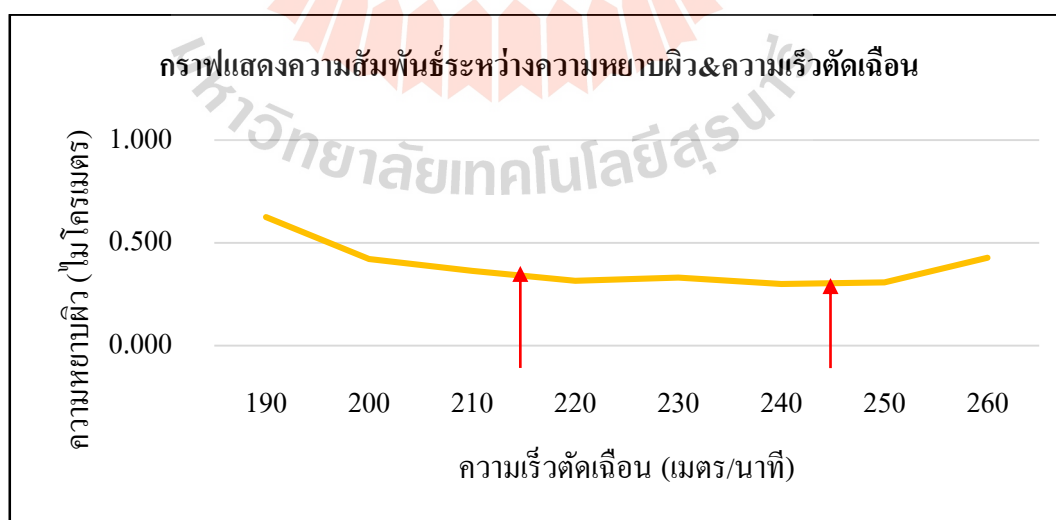
การศึกษาระดับของปัจจัย โดยการทดลองหาช่วงระดับค่าของปัจจัยเพื่อทำการคัดกรองปัจจัยที่มีอิทธิพลหลักที่คาดว่าจะส่งผลกระทบต่อความหยาบผิวและการสึกหรอของเครื่องมือตัด จากงานวิจัยที่ผ่านมาและการสอบถามข้อมูลจากโรงงานผู้ผลิตเครื่องมือตัดหลาย ๆ แห่งได้แนะนำช่วงระดับค่าของปัจจัยที่เหมาะสมแก่การใช้งาน ได้ทำการทดลองหาช่วงระดับค่าของปัจจัย ซึ่งประกอบไปด้วย อัตราป้อนต่อฟัน, ความเร็วตัดเฉือน และมุมคายเศษ ซึ่งได้ผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 3.11, 3.12 และ 3.13 จากนั้นนำผลที่ได้มาทำการวิเคราะห์ เพื่อทำการกำหนดระดับค่าของปัจจัยต่าง ๆ และทำการออกแบบการทดลองในขั้นตอนต่อไป ในการทดลองมีการควบคุมค่าของปัจจัย ดังนี้

- ความลึกของการตัดในแนวแกน 0.6 มิลลิเมตร
- ความลึกของการตัดในแนวรัศมี 6 มิลลิเมตร
- มุมเกลียว 45 องศา
- จำนวนคมตัด 3 ฟัน



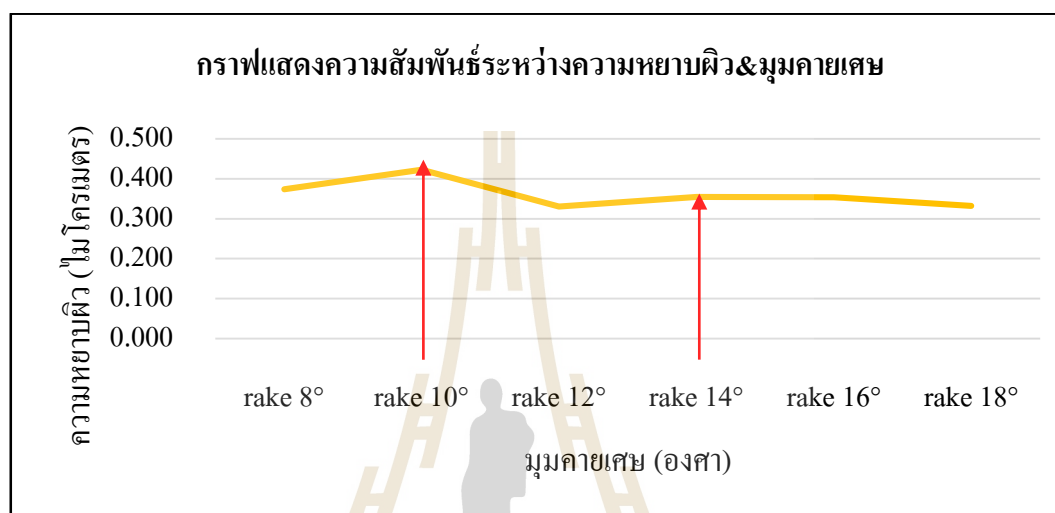
รูปที่ 3.11 ผลการทดลองระดับค่าปัจจัยของอัตราป้อนต่อฟัน

การทดลองนี้ได้กำหนดค่าตัวแปรคงที่ คือ ความเร็วตัดเฉือน 230 เมตร/นาที ความลึกของการตัดในแนวแกน 0.6 มิลลิเมตร และความลึกของการตัดในแนวรัศมี 6 มิลลิเมตร โดยทำการทดลองศึกษาอัตราป้อนต่อฟันที่ค่า 0.01, 0.02, 0.03, 0.04, 0.05, 0.06, 0.07 และ 0.08 มิลลิเมตร/ฟัน เพื่อกำหนดระดับของปัจจัยอัตราป้อนต่อฟันที่จะนำไปศึกษา คือ 0.02 กับ 0.04 เมตร/นาที



รูปที่ 3.12 ผลการทดลองระดับค่าปัจจัยของความเร็วตัดเฉือน

การทดลองนี้ได้กำหนดค่าตัวแปรคงที่ คือ อัตราป้อนต่อฟัน 0.03 มิลลิเมตร/ฟัน ความลึกของการตัดในแนวแกน 0.6 มิลลิเมตร และความลึกของการตัดในแนวรัศมี 6 มิลลิเมตร โดยทำการทดลองศึกษาความเร็วตัดเฉือนที่ค่า 190, 200, 210, 220, 230, 240, 250 และ 260 เมตร/นาที เพื่อกำหนดระดับของปัจจัยความเร็วตัดเฉือนที่นำไปศึกษา คือ 215 กับ 245 เมตร/นาที



รูปที่ 3.13 ผลการทดลองระดับค่าปัจจัยของมุมคายเศษ

การทดลองนี้ได้กำหนดค่าตัวแปรคงที่ คือ ความเร็วตัดเฉือน 230 เมตร/นาที อัตราป้อนต่อฟัน 0.03 มิลลิเมตร/ฟัน ความลึกของการตัดในแนวแกน 0.6 มิลลิเมตร และความลึกของการตัดในแนวรัศมี 6 มิลลิเมตร โดยทำการทดลองศึกษามุมคายเศษที่ค่า 8, 10, 12, 14, 16 และ 18 องศา เพื่อกำหนดระดับของปัจจัยมุมคายเศษที่นำไปศึกษา คือ 10 กับ 14 องศา

ปัจจัยหลักที่มีผลต่อความหยาบผิวและการสึกหรอของเครื่องมือตัด ซึ่งมีทั้งหมด 7 ปัจจัย ดังแสดงในตารางที่ 3.2 ซึ่งผลตอบสนองของงานวิจัยนี้ คือ ความหยาบผิวและการสึกหรอของเครื่องมือตัด (หน่วย : ไมโครเมตร)

ตารางที่ 3.2 ระดับค่าตัวแปรต่าง ๆ ที่ทำการศึกษา

ปัจจัย	หน่วย	สัญลักษณ์	ระดับของปัจจัย	
			ต่ำ(-1)	สูง(+1)
อัตราป้อนต่อฟัน	มม./ฟัน	Fz	0.02	0.04
ความเร็วตัดเฉือน	ม./นาที่	Vc	215	245
ความลึกของการตัดในแนวแกน	มม.	Ap	0.4	0.8
ความลึกของการตัดในแนวรัศมี	มม.	Ae	3	6
มุมเกลียว	องศา	Helix	35	45
มุมคายเศษ	องศา	Rake	10	14
จำนวนคมตัด	ฟัน	Z	2	3

3.2.3 ออกแบบการทดลอง

งานวิจัยนี้ ทำการออกแบบการทดลอง โดยใช้แบบแฟรคชั่น $1/8$ ของ 2^k แฟคตอเรียล (The One-Eighth Fraction of The 2^k Design หรือ 2^{k-3} Factorial Design) โดยมีปัจจัย 7 ปัจจัย ประกอบด้วยปัจจัยในการตัดเฉือน 4 ปัจจัย ได้แก่ อัตราป้อนต่อฟัน, ความเร็วตัดเฉือน, ความลึกของการตัดในแนวรัศมี และความลึกของการตัดในแนวแกน และปัจจัยที่เกี่ยวกับรูปร่างของเครื่องมือตัด 3 ปัจจัย ได้แก่ จำนวนคมตัด, มุมเกลียว และมุมคายเศษ โดยทำการทดลองที่ 2 ระดับ

ตารางที่ 3.3 จำนวนการทดลองทั้งหมด 16 การทดลอง

SidOrder	CenterPt	Blocks	Fz (mm/Z)	Vc (m/min)	Ap (mm)	Ae (mm)	Z (teeth)	Helix (degree)	Rake (degree)
1	1	1	0.02	215	0.4	3	2	35	10
2	1	1	0.04	215	0.4	3	3	35	14
3	1	1	0.02	245	0.4	3	3	45	10
4	1	1	0.04	245	0.4	3	2	45	14
5	1	1	0.02	215	0.8	3	3	45	14

ตารางที่ 3.3 จำนวนการทดลองทั้งหมด 16 การทดลอง (ต่อ)

StdOrder	CenterPt	Blocks	Fz (mm/Z)	Vc (m/min)	Ap (mm)	Ae (mm)	Z (teeth)	Helix (degree)	Rake (degree)
6	1	1	0.04	215	0.8	3	2	45	10
7	1	1	0.02	245	0.8	3	2	35	14
8	1	1	0.04	245	0.8	3	3	35	10
9	1	1	0.02	215	0.4	6	2	45	14
10	1	1	0.04	215	0.4	6	3	45	10
11	1	1	0.02	245	0.4	6	3	35	14
12	1	1	0.04	245	0.4	6	2	35	10
13	1	1	0.02	215	0.8	6	3	35	10
14	1	1	0.04	215	0.8	6	2	35	14
15	1	1	0.02	245	0.8	6	2	45	10
16	1	1	0.04	245	0.8	6	3	45	14

3.2.4 การเตรียมชิ้นงานก่อนดำเนินการทดลอง

3.2.4.1 การตรวจสอบคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุจากการทดสอบความแข็ง การทดสอบส่วนผสมทางเคมี และการทดสอบโครงสร้างจุลภาค โดยมีรายละเอียด ดังต่อไปนี้

- การทดสอบความแข็ง เริ่มจากขั้นตอนการวัดปรับระนาบด้วยเครื่องขัดผิวชิ้นงานแบบจานหมุน โดยทำการขัดด้วยกระดาษทรายเบอร์หยาบจนไปถึงกระดาษทรายเบอร์ละเอียด จากนั้นจึงทำการวัดค่าความแข็งเฉลี่ย โดยใช้เครื่อง Micro Vicker ได้ค่าความแข็งเฉลี่ยดังตารางที่ 3.4
- การทดสอบส่วนผสมทางเคมี เริ่มจากขั้นตอนการวัดปรับระนาบด้วยเครื่องขัดผิวชิ้นงานแบบจานหมุน โดยทำการขัดด้วยกระดาษทรายเบอร์หยาบจนไปถึงกระดาษทรายเบอร์ละเอียด จากนั้นจึงทำการวัดค่าส่วนผสมทางเคมี โดยใช้เครื่อง Spectrometer ได้ค่าส่วนผสมทางเคมี ดังตารางที่ 3.1
- การทดสอบโครงสร้างจุลภาค เริ่มจากขั้นตอนการวัดปรับระนาบด้วยเครื่องขัดผิวชิ้นงานแบบจานหมุน โดยทำการขัดด้วยกระดาษทรายเบอร์หยาบจนไปถึงกระดาษทรายเบอร์ละเอียด

แล้วทำการขัดอลูมินา จากนั้นจึงนำชิ้นงานไปกัดกรดเพื่อดูโครงสร้างจุลภาค โดยใช้เครื่อง Optical Microscope ดังแสดงในรูปที่ 3.2

ตารางที่ 3.4 ผลการทดสอบความแข็งของอลูมิเนียมหล่อแบบกึ่งของแข็งหมายเลข A356

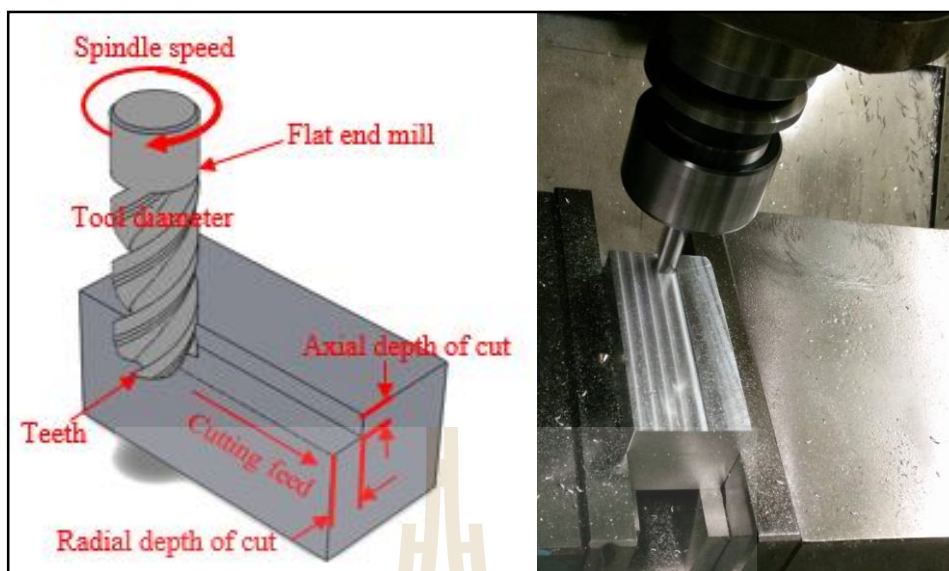
No.	ค่าความแข็ง (HV)
1	122.3
2	113.6
3	120.6
4	121.1
5	116.3
6	122.8
7	103.2
8	110.8
9	114.5
10	107.0
ค่าเฉลี่ย	115.22

3.2.4.2 การกัดเตรียมขนาดวัสดุชิ้นงานก่อนทำการทดสอบ 48 x 100 x 48 มิลลิเมตร (ความกว้าง x ความยาว x ความสูง) ดังแสดงในรูปที่ 3.1 ด้วยเครื่องกัดซีเอ็นซี

3.2.4.3 การตรวจสอบคมตัดเนื้อของเครื่องมือตัด คือ ดอกกัดเอ็นมิลล์ (End mill) ที่ผลิตมาจากวัสดุคาร์ไบด์ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 มิลลิเมตร ความยาวของคมตัด 20 มิลลิเมตร และความยาวดอกทั้งหมด 74 มิลลิเมตร ล้างทำความสะอาดด้วยแอลกอฮอล์ก่อนทำการตรวจสอบคมตัดเนื้อด้วยกล้อง Optical Microscope

3.2.5 ดำเนินการทดสอบ

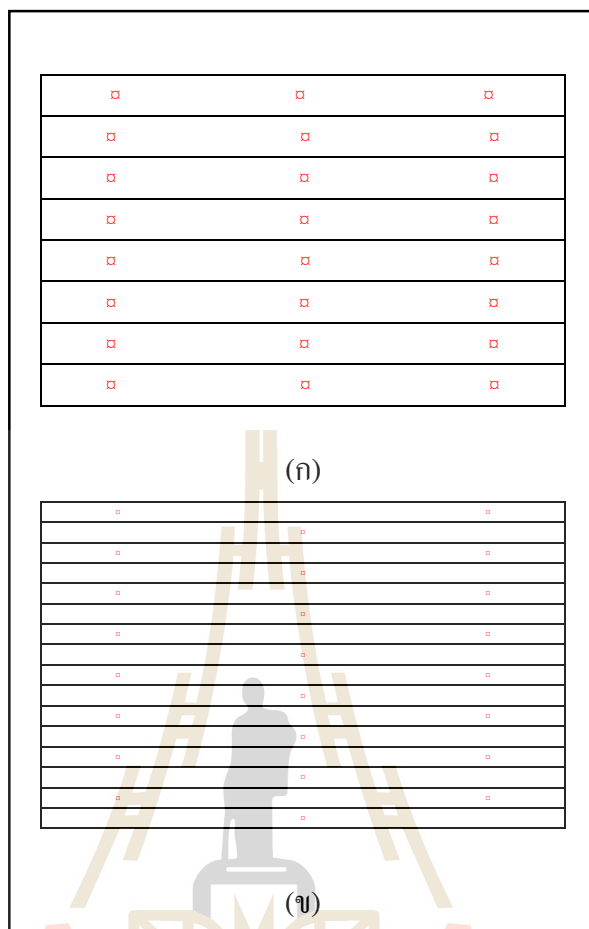
การออกแบบวิธีการกัดปาดผิวหน้าอลูมิเนียมหล่อแบบกึ่งของแข็งหมายเลข A356 โดยที่ชิ้นงานมีขนาด 48 x 100 x 48 มิลลิเมตร (ความกว้าง x ความยาว x ความสูง) ดอกกัดเอ็นมิลล์ที่ใช้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 มิลลิเมตร มีทิศทางป้อนกัดตามแนวแกน Y ดังแสดงในรูปที่ 3.14



รูปที่ 3.14 การกัดปาดผิวหน้าอลูมิเนียมหล่อแบบกึ่งของแข็งหมายเลข A356

3.2.5.1 ศึกษาความหยาบผิวของอลูมิเนียมหล่อแบบกึ่งของแข็งหมายเลข A356 บันทึกผลความหยาบผิวที่รอบแรกของแต่ละงาน การทดลองได้จำนวน 24 ตำแหน่ง ในการวัด โดยออกแบบวิธีการวัดดังแสดงในรูปที่ 3.15 จากการทดลองดอ กัดเอ็นมิลล์เคลื่อนที่ไปบนชิ้นงาน ในแต่ละรอบ รอบละ 480 ตารางมิลลิเมตร โดยวัดค่าความหยาบผิวเฉลี่ยเลขคณิต (Roughness average : Ra) มีหน่วยวัดเป็นไมโครเมตร (μm) มาตรฐานที่ใช้ในการทดสอบ คือ ISO 4287 : 1997

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



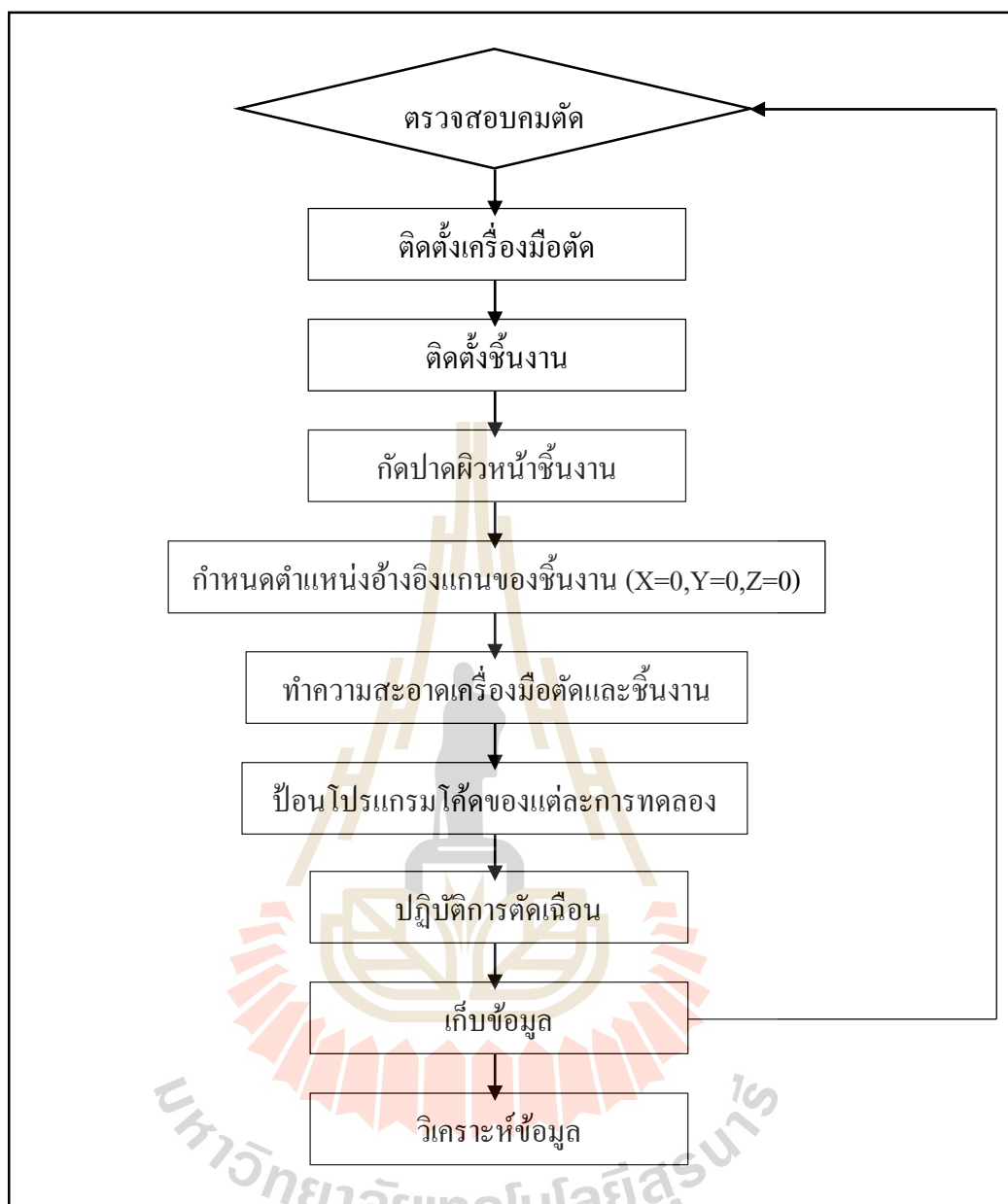
รูปที่ 3.15 ตำแหน่งวัดผลความหยาบผิว 2 แบบแบ่งตามความลึกของการตัดในแนวรัศมี
6 มิลลิเมตร(ก) และ 3 มิลลิเมตร(ข)

การวัดค่าความหยาบผิว ควรวัดทันที เมื่อกัดปาดหน้าเสร็จและก่อนวัดควรรวกลี
เบรทเครื่องมือก่อนวัดเสมอ ดังแสดงในรูปที่ 3.16 เพื่อลดความคลาดเคลื่อนของข้อมูล



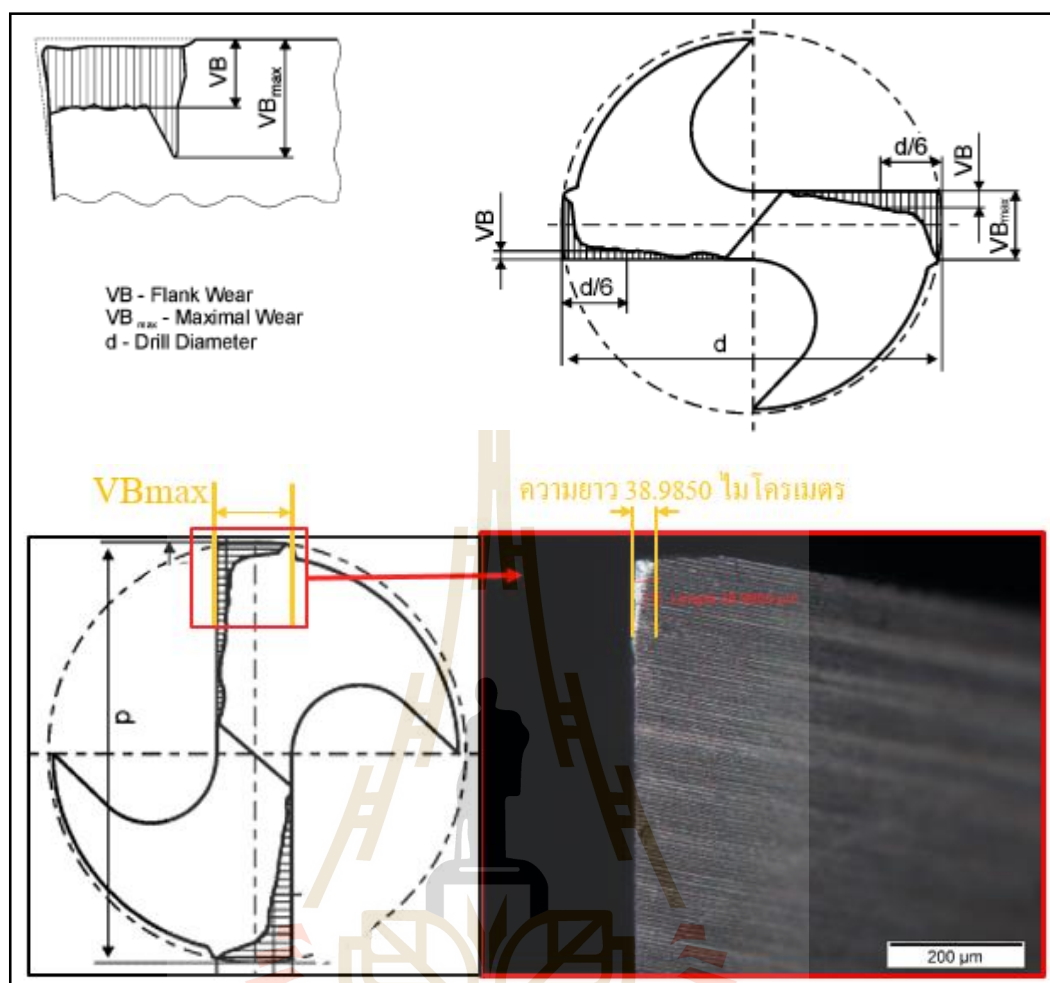
รูปที่ 3.16 คาลิเบรตเครื่องมือก่อนวัดเสมอ

3.2.5.2 ศึกษาการสึกหรอของเครื่องมือตัดในกระบวนการกัดวัสดุอลูมิเนียมหล่อแบบกึ่งของแข็ง A356 บันทึกผลขนาดการสึกหรอบนผิวหลบที่รอบที่ 1, 2, 3, 4, 5, 10 และ 40 ของทุก ๆ การทดลองตามขั้นตอนการดำเนินงานทดลอง ดังแสดงในรูปที่ 3.17 จากการทดลองดอกกัดเอ็นมิลล์เคลื่อนที่ไปบนชิ้นงานในแต่ละรอบ รอบละ 480 ตารางมิลลิเมตร โดยวัดขนาดการสึกหรอบนผิวหลบ (Flank Wear) มีหน่วยวัดเป็นไมโครเมตร (μm) มาตรฐานที่ใช้ในการทดสอบ คือ ISO 3685 : 1993 (ยุโรป)



รูปที่ 3.17 ขั้นตอนการดำเนินการทดลอง

การวัดขนาดการสึกหรอบนผิวหلب (Flank Wear : VB) ในขั้นตอนการตรวจสอบคมตัด ดังแสดงในรูปที่ 3.18 โดยใช้กล้อง Optical Microscope ยี่ห้อ OLYMPUS ก่อนวัดควรเช็ดทำความสะอาดดอกกัดเอ็นมิลล์ด้วยแอลกอฮอล์เพื่อลดความคลาดเคลื่อนของข้อมูล



รูปที่ 3.18 การวัดขนาดการสึกหรอบนผิวหอบ

3.2.6 การเก็บรวบรวมข้อมูล

งานวิจัยนี้ทำการเก็บรวบรวมข้อมูลที่ได้จากการดำเนินการทดลอง โดยทำการบันทึกผลการทดลอง ดังต่อไปนี้

- บันทึกผลการวัดค่าความหยาบผิวเฉลี่ยเลขคณิต (R_a)
- บันทึกผลการวัดขนาดการสึกหรอบนผิวหอบ (VB)

3.2.7 การวิเคราะห์ข้อมูล

วิเคราะห์ผลการทดลองจากการออกแบบการทดลองแบบเศษส่วนเชิงแฟคทอเรียล (Fractional Factorial Design) ด้วยการวิเคราะห์ค่าความแปรปรวน (ANOVA) ของผลการทดลอง เพื่อคัดกรองปัจจัยหลักที่ทำการศึกษานั้นว่า ปัจจัยที่มีอิทธิพลหลักต่อความหยาบผิวและการสึกหรอของเครื่องมือตัดในกระบวนการกัดวัสดุอลูมิเนียมหล่อแบบกึ่งของแข็ง A356 ด้วยโปรแกรม Minitab R. 16



บทที่ 4

ผลการทดลองและการวิเคราะห์ข้อมูล

งานวิจัยนี้ทำการเก็บรวบรวมข้อมูลที่ได้จากการดำเนินการทดลองตามขั้นตอนที่ได้กล่าวไว้ โดยผู้วิจัยได้ดำเนินการบันทึกผลการทดลองและการวิเคราะห์ข้อมูล เพื่อคัดกรองปัจจัยที่มีอิทธิพลหลักต่อความหยาบผิวและการสึกหรอของเครื่องมือตัดในกระบวนการกัดวัสดุอลูมิเนียมหล่อแบบกึ่งของแข็ง A356 รายละเอียดในบทนี้จึงประกอบด้วย

- 1) การทดสอบความหยาบผิว
- 2) การทดสอบการสึกหรอของเครื่องมือตัด
- 3) การแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหยาบผิว กับ การสึกหรอของเครื่องมือตัด

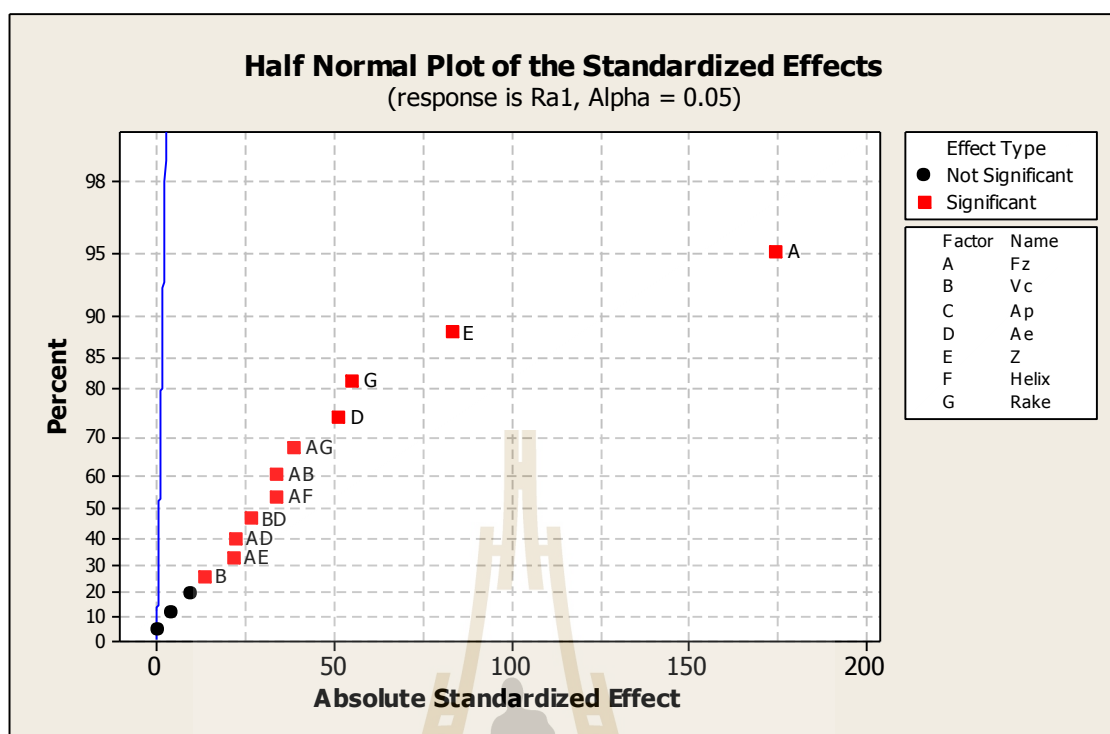
4.1 ผลการทดลองและการวิเคราะห์การทดลองที่ 1 การทดลองเพื่อคัดกรองปัจจัยที่มีอิทธิพลหลักต่อความหยาบผิว

การวิจัยครั้งนี้ได้ศึกษา เพื่อคัดกรองปัจจัยที่มีอิทธิพลหลักทั้ง 7 ปัจจัย ที่คาดว่าจะมีผลต่อความหยาบผิวในกระบวนการกัดวัสดุอลูมิเนียมหล่อแบบกึ่งของแข็ง A356 ประกอบด้วยปัจจัยในการตัดเฉือน 4 ปัจจัย ได้แก่ อัตราป้อนต่อฟัน (F_z), ความเร็วตัดเฉือน (V_c), ความลึกของการตัดในแนวรัศมี (A_e), ความลึกของการตัดในแนวแกน (A_p) และปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับรูปร่างของเครื่องมือตัด 3 ปัจจัย ได้แก่ จำนวนคมตัด (Z), มุมเกลียว (Helix) และมุมคายเศษ (Rake) ใช้วิธีการออกแบบการทดลองแบบแฟรคชัน $1/8$ ของ 2^k แฟคตอเรียล (The One-Eighth Fraction of The 2^k Design หรือ 2^{k-3} Factorial Design) และการทดลองในแต่ละครั้งจะต้องทำภายใต้การสุ่มลำดับการทดลอง ซึ่งเป็นไปตามกฎเบื้องต้นของการออกแบบการทดลอง ได้จำนวนการทดลองทั้งหมด $2^{7-3} = 16$ การทดลอง ทำการทดลองที่ 2 ระดับและทำการทดลองซ้ำ 1 ครั้ง โดยแต่ละการทดลองทำการกัดวัสดุอลูมิเนียมหล่อแบบกึ่งของแข็ง A356 จำนวน 1 รอบ (รอบละ 480 ตารางมิลลิเมตร) ซึ่งได้ผลการทดลองตามตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ผลการวัดค่าความหยาบผิวโดยเฉลี่ยของการทดลองที่ 1-16

StdOrder	RunOrder	CenterPt	Blocks	Fz (mm/Z)	Vc (m/min)	Ap (mm)	Ae (mm)	Z (teeth)	Helix (degree)	Rake (degree)	Ra (μ m)
12	1	1	1	0.04	245	0.4	6	2	35	10	0.311
14	2	1	1	0.04	215	0.8	6	2	35	14	0.576
9	3	1	1	0.02	215	0.4	6	2	45	14	0.209
10	4	1	1	0.04	215	0.4	6	3	45	10	0.621
15	5	1	1	0.02	245	0.8	6	2	45	10	0.167
7	6	1	1	0.02	245	0.8	3	2	35	14	0.237
2	7	1	1	0.04	215	0.4	3	3	35	14	0.564
13	8	1	1	0.02	215	0.8	6	3	35	10	0.316
6	9	1	1	0.04	215	0.8	3	2	45	10	0.344
3	10	1	1	0.02	245	0.4	3	3	45	10	0.262
4	11	1	1	0.04	245	0.4	3	2	45	14	0.429
8	12	1	1	0.04	245	0.8	3	3	35	10	0.415
16	13	1	1	0.04	245	0.8	6	3	45	14	0.673
1	14	1	1	0.02	215	0.4	3	2	35	10	0.151
11	15	1	1	0.02	245	0.4	6	3	35	14	0.337
5	16	1	1	0.02	215	0.8	3	3	45	14	0.208

จากตารางที่ 4.1. จะเห็นสภาวะการตัดเฉือนที่ให้ค่าความหยาบผิวน้อยที่สุด คือ การทดลองตามมาตรฐานที่ 1 ประกอบด้วย อัตราป้อนต่อฟัน 0.02 มิลลิเมตร/ฟัน, ความเร็วตัดเฉือน 215 เมตร/นาที, ความลึกของการตัดในแนวรัศมี 3 มิลลิเมตร, ความลึกของการตัดในแนวแกน 0.4 มิลลิเมตร, จำนวนคมตัด 2 ฟัน, มุมเกลียว 35 องศา และมุมคายเศษ 14 องศา ได้ค่าความหยาบผิว 0.151 ไมโครเมตร



รูปที่ 4.1 ความน่าจะเป็นแบบปกติของตัวประมาณของอิทธิพลทั้งหมด

จากรูปที่ 4.1 คือ แผนภาพความน่าจะเป็นแบบปกติครึ่ง (Half normal plot) แสดงค่าสัมบูรณ์ตัวประมาณของอิทธิพลใดๆ จะเห็นว่า อิทธิพลหลัก (main effect) คือ A, E, G, D และ B และปัจจัยร่วมระหว่างปัจจัย AG, AB, AF, BD, AD และ AE มีแนวโน้มไม่ได้อยู่บนเส้นตรงของแผนภาพความน่าจะเป็นแบบปกติของตัวประมาณของอิทธิพลใดๆ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าอิทธิพลอัตราป้อนต่อฟัน (ปัจจัย A), จำนวนคมตัด (ปัจจัย E), มุมคายเศษ (ปัจจัย G), ความลึกของการตัดในแนวรัศมี (ปัจจัย D) และความเร็วตัดเฉือน (ปัจจัย B) ส่วนอิทธิพลระหว่างสองปัจจัย (interaction) คือ อัตราป้อนต่อฟัน*มุมคายเศษ (ปัจจัย AG), อัตราป้อนต่อฟัน*ความเร็วตัดเฉือน (ปัจจัย AB), อัตราป้อนต่อฟัน*มุมเกลียว (ปัจจัย AF), ความเร็วตัดเฉือน*ความลึกของการตัดในแนวรัศมี (ปัจจัย BD), อัตราป้อนต่อฟัน*ความลึกของการตัดในแนวรัศมี (ปัจจัย AD) และอัตราป้อนต่อฟัน*จำนวนคมตัด (ปัจจัย AE) มีผลต่อความหยาบผิวในกระบวนการกัดอลูมิเนียมกึ่งของแข็ง A356 โดยเฉลี่ยอย่างมีนัยสำคัญ นำปัจจัยที่ได้ไปวิเคราะห์ข้อมูลเพื่อหาค่า P-Value ได้ผลการวิเคราะห์ข้อมูลดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 การวิเคราะห์ความแปรปรวน (analysis of variance, ANOVA)

Analysis of Variance for Ra1 using Adjusted SS for Tests						
Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
อิทธิพลหลัก	7	0.37145	0.37145	0.05307	6193.43	0.010
อัตราป้อนต่อฟัน (Fz)	1	0.26173	0.26173	0.26173	30547.82	0.004
ความเร็วตัดเนื้อ (Vc)	1	0.00157	0.00157	0.00157	182.59	0.047
ความลึกของการตัดใน แนวแกน(Ap)	1	0.000178	0.000178	0.00018	20.46	0.139
ความลึกของการตัดในแนวรัศมี (Ae)	1	0.02251	0.02251	0.02251	2627.20	0.012
จำนวนคมตัด (Z)	1	0.05932	0.05932	0.05932	6923.31	0.008
มุมเกลียว (Helix)	1	0.00000	0.00000	0.00000	0.20	0.730
มุมคายเศษ (Rake)	1	0.02615	0.02615	0.02615	3052.46	0.012
อิทธิพลร่วม 2 ตัวแปร	7	0.04751	0.04751	0.00679	792.17	0.027
อัตราป้อนต่อฟัน*ความเร็วตัด เนื้อ	1	0.00984	0.00984	0.00984	1148.51	0.019
อัตราป้อนต่อฟัน*ความลึกของ การตัดในแนวแกน	1	0.00081	0.00081	0.00081	94.87	0.065
อัตราป้อนต่อฟัน*ความลึกของ การตัดในแนวรัศมี	1	0.00419	0.00419	0.00419	488.87	0.029
อัตราป้อนต่อฟัน*จำนวนคมตัด	1	0.00397	0.00397	0.00397	463.70	0.030
อัตราป้อนต่อฟัน*มุมเกลียว	1	0.00979	0.00979	0.00979	1142.25	0.019
อัตราป้อนต่อฟัน*มุมคายเศษ	1	0.01293	0.01293	0.01293	1508.81	0.016
ความเร็วตัดเนื้อ*ความลึกของ การตัดในแนวรัศมี	1	0.00598	0.00598	0.00598	698.20	0.024
Residual Error	1	0.00001	0.00001	0.00001		
Total	15	0.418968				

การทดสอบสมมุติฐานของการวิเคราะห์ความแปรปรวน (Formal test of ANOVA)

ตั้งสมมุติฐาน

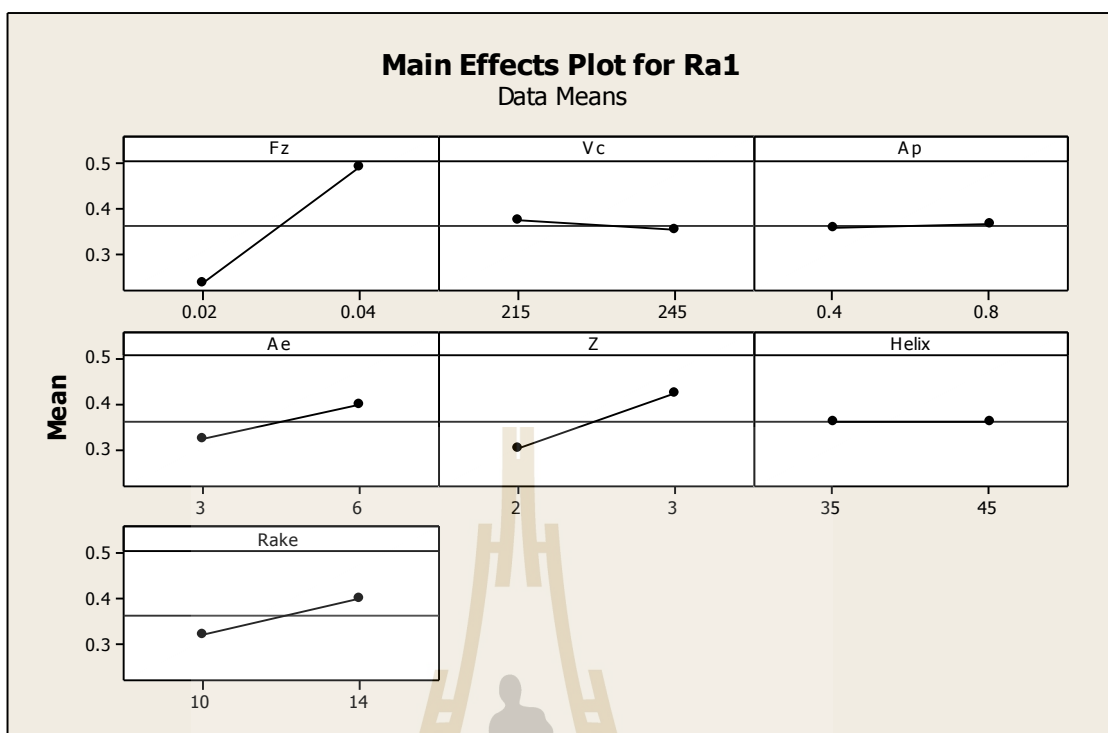
H_0 : ตัวแปรไม่มีผลต่อความหยาบผิวในกระบวนการกัดอลูมิเนียมหล่อแบบกึ่งของแข็ง A356

H_1 : ตัวแปรมีความผลต่อความหยาบผิวในกระบวนการกัดอลูมิเนียมหล่อแบบกึ่งของแข็ง A356

จากตารางที่ 4.2 ทำการวิเคราะห์ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซนต์หรือที่ระดับนัยสำคัญ 5 เปอร์เซนต์ มีเกณฑ์การตัดสินใจ คือ ถ้าค่า P-Value มีค่าน้อยกว่า 0.05 จะปฏิเสธ H_0 ซึ่งหมายถึง ตัวแปรนั้น ๆ มีผลต่อความหยาบผิวในกระบวนการกัดอลูมิเนียมหล่อแบบกึ่งของแข็ง A356

พบว่า ปัจจัยหลักที่มีอิทธิพลต่อความหยาบผิวที่สำคัญมากไปน้อย คือ อัตราป้อนต่อฟัน (F_z), จำนวนคมตัด (Z), ความลึกของการตัดในแนวรัศมี (A_e), มุมคายเศษ (Rake) และความเร็วตัดเฉือน (V_c) เนื่องจากมีค่า P-Value มีค่าน้อยกว่าระดับนัยสำคัญ ($\alpha = 0.05$) ดังนั้นจึงทำการยอมรับสมมุติฐาน H_1

พบว่า อัตราป้อนต่อฟัน*ความลึกของการตัดในแนวแกน เป็นอิทธิพลร่วมที่มีผลต่อความหยาบผิว มีค่า P-Value เท่ากับ 0.065 ดังแสดงในตารางที่ 4.2 ซึ่งเป็นค่าที่ใกล้ระดับนัยสำคัญ ($\alpha = 0.05$) ดังนั้น อิทธิพลร่วมดังกล่าว จึงไม่สามารถระบุได้ชัดว่ามีผลต่อความหยาบผิวหรือไม่ เนื่องจากการออกแบบการทดลองแบบแฟรคชัน 1/8 ของ 2^k แฟคตอเรียล (The One-Eighth Fraction of The 2^k Design หรือ 2^{k-3} Factorial Design) เป็นการออกแบบการทดลองที่เหมาะสมแก่การคัดกรองปัจจัยหลักเท่านั้น ดังนั้นการศึกษาถึงอิทธิพลร่วมต้องทำการทดลองเพิ่ม โดยทำการทดลองแบบ 2^k แฟคตอเรียล (2^k Full Factorial Design) เพื่อศึกษาอิทธิพลร่วมที่มีผลต่อความหยาบผิว



รูปที่ 4.2 แผนภาพอิทธิพลหลัก ในการทดสอบความหยาบผิว

จากการวิเคราะห์อิทธิพลอิทธิพลหลัก (main effect plot) ทั้ง 7 ปัจจัย ประกอบด้วย อัตราป้อนต่อฟัน (Fz), ความเร็วตัดเฉือน (Vc), ความลึกของการตัดในแนวรัศมี (Ae), ความลึกในการกัดในแนวแกน (Ap), จำนวนคมตัด (Z), มุมเกลียว (Helix) และมุมคายเศษ (Rake) จากรูปที่ 4.2 แสดงแผนภาพอิทธิพลหลัก พบว่า ความชันของปัจจัยหลักป้อนต่อฟัน (Fz), ความลึกของการตัดในแนวรัศมี (Ae), จำนวนคมตัด (Z) และมุมคายเศษ (Rake) มีค่าเป็นบวก หมายถึง เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงระดับปัจจัยหนึ่งหน่วย จะส่งผลให้ค่าความหยาบผิวเพิ่มขึ้น ในทางกลับกัน ความชันของปัจจัยความเร็วตัดเฉือน (Vc) มีค่าเป็นลบ หมายถึง เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงระดับปัจจัยหนึ่งหน่วย จะส่งผลให้ค่าความหยาบผิวลดลง และจะเห็นได้ว่า ความชันของปัจจัยความลึกในการกัดในแนวแกน (Ap) และมุมเกลียว (Helix) มีค่าเข้าใกล้ศูนย์ หมายถึง เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงระดับปัจจัยหนึ่งหน่วย จะไม่ส่งผลต่อความหยาบผิว เนื่องจากการกำหนดขอบเขตระยะห่างของระดับค่าของปัจจัยต่างกันน้อยเกินไป และระดับค่าของปัจจัยอยู่ในช่วงที่เหมาะสม

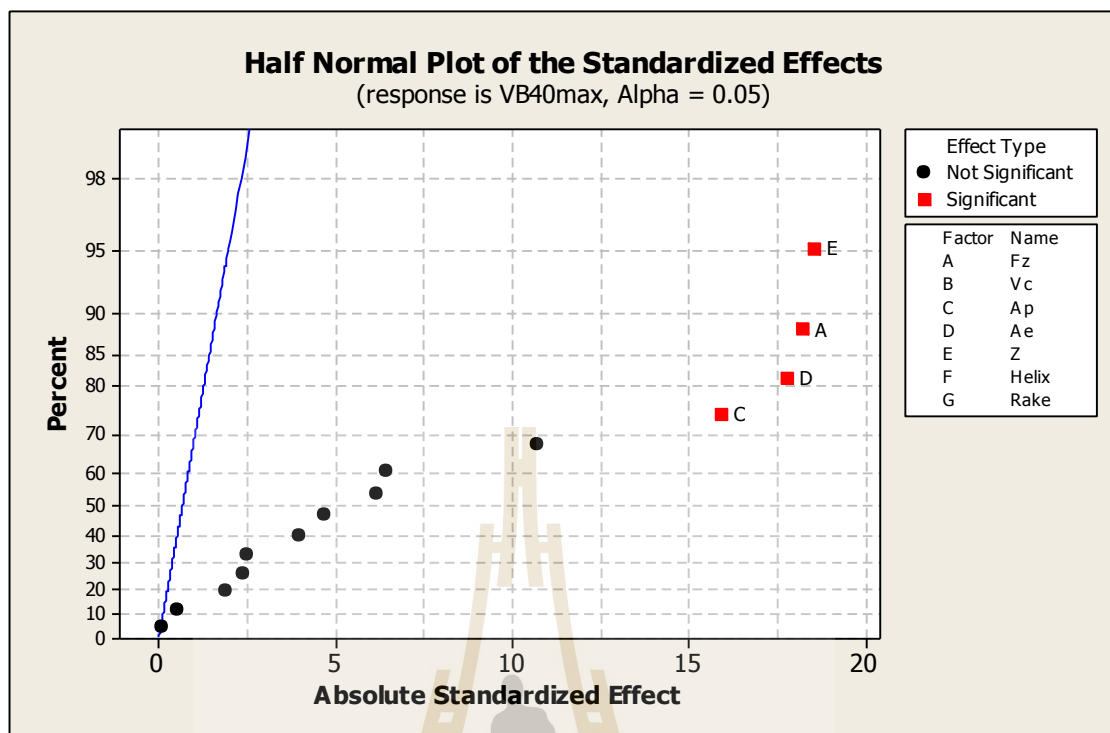
4.2 ผลการทดลองและการวิเคราะห์การทดลองที่ 2 การทดลองเพื่อคัดกรองปัจจัยที่มีอิทธิพลหลักต่อการสึกหรอของเครื่องมือตัด

การวิจัยครั้งนี้ได้ศึกษา เพื่อคัดกรองปัจจัยที่มีอิทธิพลหลักทั้ง 7 ปัจจัย ที่คาดว่าจะมีผลต่อการสึกหรอของเครื่องมือตัดในกระบวนการกัดวัสดุอะลูมิเนียมหล่อแบบกึ่งของแข็ง A356 ประกอบด้วย ปัจจัยในการตัดเฉือน 4 ปัจจัย ได้แก่ อัตราป้อนต่อฟัน (F_z), ความเร็วตัดเฉือน (V_c), ความลึกของการตัดในแนวรัศมี (A_e), ความลึกของการตัดในแนวแกน (A_p) และปัจจัยที่เกี่ยวข้องรูปร่างของเครื่องมือตัด 3 ปัจจัย ได้แก่ จำนวนคมตัด (Z), มุมเกลียว (Helix) และมุมคายเศษ (Rake) ใช้วิธีการออกแบบการทดลองแบบแฟรคชัน $1/8$ ของ 2^k แฟคตอเรียล (The One-Eighth Fraction of The 2^k Design หรือ 2^{k-3} Factorial Design) และการทดลองในแต่ละครั้งจะต้องทำภายใต้การสุ่มลำดับการทดลอง ซึ่งเป็นไปตามกฎเบื้องต้นของการออกแบบการทดลอง ได้จำนวนการทดลองทั้งหมด $2^{7-3} = 16$ การทดลอง ทำการทดลองที่ 2 ระดับและทำการทดลองซ้ำ 1 ครั้ง โดยแต่ละการทดลองทำการกัดวัสดุอะลูมิเนียมหล่อแบบกึ่งของแข็ง A356 จำนวน 40 รอบ (รอบละ 480 ตารางมิลลิเมตร) ได้ผลการทดลองดังนี้

จากตารางที่ 4.3 จะเห็นสถานะการตัดเฉือนที่ให้ค่าขนาดการสึกหรอบนผิวหกลบน้อยที่สุด คือ การทดลองตามมาตรฐานที่ 5 ประกอบด้วย อัตราป้อนต่อฟัน 0.02 มิลลิเมตร/ฟัน, ความเร็วตัดเฉือน 215 เมตร/นาที, ความลึกของการตัดในแนวรัศมี 3 มิลลิเมตร, ความลึกของการตัดในแนวแกน 0.8 มิลลิเมตร, จำนวนคมตัด 3 ฟัน, มุมเกลียว 45 องศา และมุมคายเศษ 14 องศา ได้ค่าขนาดการสึกหรอบนผิวหกลบสูงสุดได้ 22.75 ไมโครเมตร และสถานะการตัดเฉือนที่ให้ค่าขนาดการสึกหรอบนผิวหกลบมากที่สุด คือ การทดลองตามมาตรฐานที่ 12 ประกอบด้วย อัตราป้อนต่อฟัน 0.04 มิลลิเมตร/ฟัน, ความเร็วตัดเฉือน 245 เมตร/นาที, ความลึกของการตัดในแนวรัศมี 6 มิลลิเมตร, ความลึกของการตัดในแนวแกน 0.4 มิลลิเมตร, จำนวนคมตัด 2 ฟัน, มุมเกลียว 35 องศา และมุมคายเศษ 10 องศา ได้ค่าขนาดการสึกหรอบนผิวหกลบสูงสุดได้ 70.13 ไมโครเมตร

ตารางที่ 4.3 ผลการวัดขนาดการสึกหรอบนผิวหลักโดยสูงสุดของการทดลองที่ 1-16

StdOrder	RunOrder	CenterPt	Blocks	Fz (mm/Z)	Vc (m/min)	Ap (mm)	Ae (mm)	Z (teeth)	Helix (degree)	Rake (degree)	VB (μ m)
12	1	1	1	0.04	245	0.4	6	2	35	10	70.13
14	2	1	1	0.04	215	0.8	6	2	35	14	46.94
9	3	1	1	0.02	215	0.4	6	2	45	14	51.05
10	4	1	1	0.04	215	0.4	6	3	45	10	52.55
15	5	1	1	0.02	245	0.8	6	2	45	10	41.91
7	6	1	1	0.02	245	0.8	3	2	35	14	35.73
2	7	1	1	0.04	215	0.4	3	3	35	14	58.09
13	8	1	1	0.02	215	0.8	6	3	35	10	43.89
6	9	1	1	0.04	215	0.8	3	2	45	10	55.44
3	10	1	1	0.02	245	0.4	3	3	45	10	32.31
4	11	1	1	0.04	245	0.4	3	2	45	14	39.73
8	12	1	1	0.04	245	0.8	3	3	35	10	47.95
16	13	1	1	0.04	245	0.8	6	3	45	14	40.25
1	14	1	1	0.02	215	0.4	3	2	35	10	37.44
11	15	1	1	0.02	245	0.4	6	3	35	14	44.72
5	16	1	1	0.02	215	0.8	3	3	45	14	22.75



รูปที่ 4.3 ความน่าจะเป็นแบบปกติของตัวประมาณของอิทธิพลทั้งหมด

จากรูปที่ 4.3 คือ แผนภาพความน่าจะเป็นแบบปกติครึ่ง (Half normal plot) แสดงค่าสัมบูรณ์ตัวประมาณของอิทธิพลใด ๆ จะเห็นว่า อิทธิพลหลัก (main effect) คือ E, A, D และ C มีแนวโน้มไม่ได้อยู่บนเส้นตรงของแผนภาพความน่าจะเป็นแบบปกติของตัวประมาณของอิทธิพลใด ๆ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าอิทธิพล จำนวนคมตัด (ปัจจัย E), อัตราป้อนต่อฟัน (ปัจจัย A), ความลึกของการตัดในแนวรัศมี (ปัจจัย D), และความลึกของการตัดในแนวแกน (ปัจจัย C) มีผลต่อการสึกหรอของเครื่องมือตัดในกระบวนการกัดอลูมิเนียมของแข็ง A356 โดยเฉลี่ยอย่างมีนัยสำคัญ นำปัจจัยที่ได้ไปวิเคราะห์ข้อมูลเพื่อหาค่า P-Value ได้ผลการวิเคราะห์ข้อมูลดังตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 การวิเคราะห์ความแปรปรวน (analysis of variance, ANOVA)

Analysis of Variance for VB40max using Adjusted SS for Tests						
Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
อิทธิพลหลัก	7	1717.15	1717.15	245.307	195.56	0.055
อัตราป้อนต่อพิน (Fz)	1	417.79	417.79	417.794	333.06	0.035
ความเร็วตัดเนื้อ (Vc)	1	0.02	0.02	0.021	0.02	0.918
ความลึกของการตัดใน แนวแกน(Ap)	1	317.91	317.91	317.909	253.44	0.040
ความลึกของการตัดในแนวรัศมี (Ae)	1	397.01	397.01	397.006	316.49	0.036
จำนวนคมตัด (Z)	1	432.85	432.85	432.848	345.06	0.034
มุมเกลียว (Helix)	1	143.76	143.76	143.760	114.60	0.059
มุมคายเศษ (Rake)	1	7.81	7.81	7.812	6.23	0.243
อิทธิพลรวม 2 ตัวแปร	7	159.86	159.86	22.837	18.21	0.179
อัตราป้อนต่อพิน*ความเร็วตัด เนื้อ	1	52.06	52.06	52.056	41.50	0.098
อัตราป้อนต่อพิน*ความลึกของ การตัดในแนวแกน	1	4.58	4.58	4.580	3.65	0.307
อัตราป้อนต่อพิน*ความลึกของ การตัดในแนวรัศมี	1	0.35	0.35	0.354	0.28	0.689
อัตราป้อนต่อพิน*จำนวนคมตัด	1	47.82	47.82	47.817	38.12	0.102
อัตราป้อนต่อพิน*มุมเกลียว	1	19.80	19.80	19.802	15.79	0.157
อัตราป้อนต่อพิน*มุมคายเศษ	1	7.26	7.26	7.263	5.79	0.251
ความเร็วตัดเนื้อ*ความลึกของ การตัดในแนวรัศมี	1	27.98	27.98	27.984	22.31	0.133
Residual Error	1	1.25	1.25	1.254		
Total	15	1878.26				

การทดสอบสมมุติฐานของการวิเคราะห์ความแปรปรวน (Formal test of ANOVA)

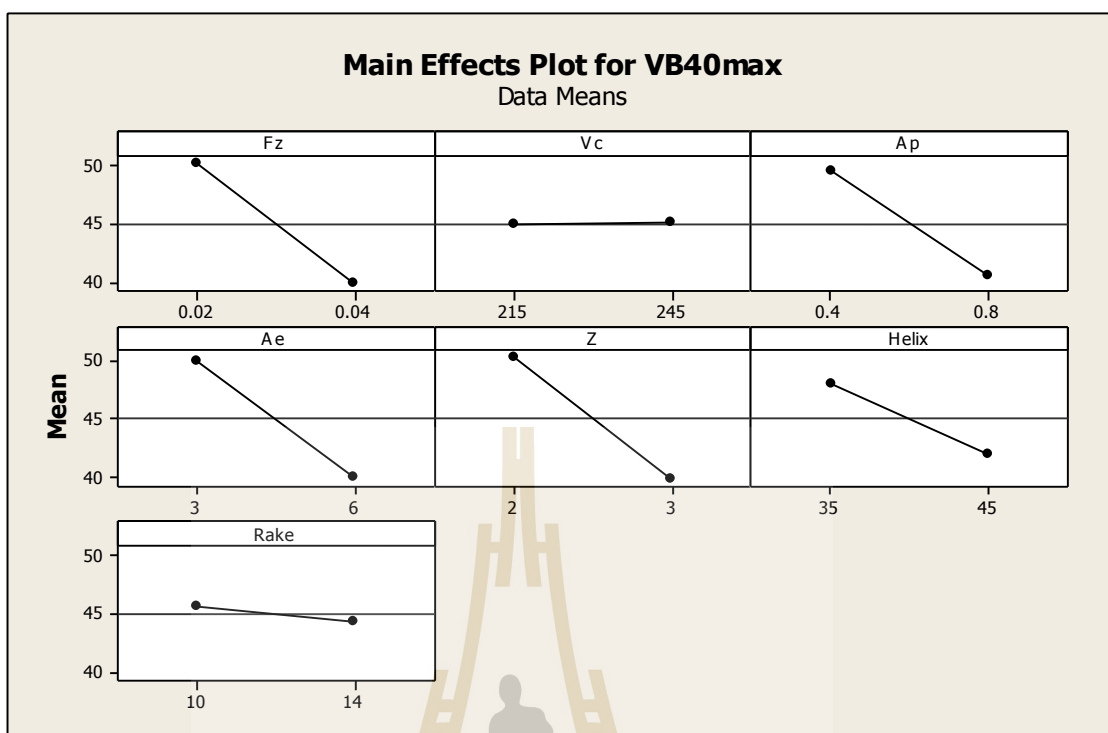
ตั้งสมมุติฐาน

H_0 : ตัวแปรไม่มีผลต่อการสึกหรอของเครื่องมือตัดในกระบวนการกัดวัสดุอลูมิเนียมหล่อแบบกึ่งของแข็ง A356

H_1 : ตัวแปรมีผลต่อการสึกหรอของเครื่องมือตัดในกระบวนการกัดวัสดุอลูมิเนียมหล่อแบบกึ่งของแข็ง A356

จากตารางที่ 4.4 ทำการวิเคราะห์ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซนต์หรือที่ระดับนัยสำคัญ 5 เปอร์เซนต์ มีเกณฑ์การตัดสินใจ คือ ถ้าค่า P-Value มีค่าน้อยกว่า 0.05 จะปฏิเสธ H_0 ซึ่งหมายถึง ตัวแปรนั้น ๆ มีผลต่อการสึกหรอของเครื่องมือตัดในกระบวนการกัดวัสดุอลูมิเนียมหล่อแบบกึ่งของแข็ง A356

พบว่า ปัจจัยหลักที่มีอิทธิพลต่อการสึกหรอของเครื่องมือตัดที่สำคัญมากไปน้อย คือ จำนวนคมตัด (Z), อัตราป้อนต่อฟัน (Fz), ความลึกของการตัดในแนวรัศมี (Ae) และความลึกของการตัดในแนวแกน (Ap) เนื่องจากมีค่า P-Value มีค่าน้อยกว่าระดับนัยสำคัญ ($\alpha = 0.05$) ไม่พบว่า มีปัจจัยร่วมที่มีอิทธิพลต่อการสึกหรอของเครื่องมือตัด เนื่องจากมีค่า P-Value มีค่าน้อยกว่าระดับนัยสำคัญ ($\alpha = 0.05$) ดังนั้นจึงทำการยอมรับสมมุติฐาน H_1



รูปที่ 4.4 แผนภาพอิทธิพลหลัก ในการทดสอบการสึกหรอของเครื่องมือตัด

จากการวิเคราะห์อิทธิพลอิทธิพลหลัก (main effect plot) ทั้ง 7 ปัจจัย ประกอบด้วย อัตราป้อนต่อฟัน (F_z), ความเร็วตัดเนื้อ (V_c), ความลึกของการตัดในแนวรัศมี (A_e), ความลึกในการกัดในแนวแกน (A_p), จำนวนคมตัด (Z), มุมเกลียว ($Helix$) และมุมคายเศษ ($Rake$) จากรูปที่ 4.4 แสดงแผนภาพอิทธิพลหลัก พบว่า ความชันของปัจจัยหลักป้อนต่อฟัน (F_z), ความลึกของการตัดในแนวรัศมี (A_e), ความลึกในการกัดในแนวแกน (A_p) และจำนวนคมตัด (Z) มีค่าเป็นลบ หมายถึง เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงระดับปัจจัยหนึ่งหน่วย จะส่งผลให้การสึกหรอของเครื่องมือตัดลดลงและจะเห็นได้ว่า ความชันของปัจจัยความเร็วตัดเนื้อ (V_c) และมุมคายเศษ ($Rake$) มีค่าเข้าใกล้ศูนย์ หมายถึง เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงระดับปัจจัยหนึ่งหน่วย จะไม่ส่งผลต่อการสึกหรอของเครื่องมือตัด เนื่องจากการกำหนดขอบเขตระยะห่างของระดับค่าของปัจจัยต่างกันน้อยเกินไปและระดับค่าของปัจจัยอยู่ในช่วงที่เหมาะสม



4.3 ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลต่าง ๆ ที่ได้จากการทดลอง

4.3.1 ตรวจสอบว่าการสึกหรอของเครื่องมือตัดมีความสัมพันธ์ต่อความหนาผิวอย่างไร

General Regression Analysis: Ra (µm) versus VB (µm)

Regression Equation

$$Ra (\mu m) = 0.825549 - 0.0102507 VB (\mu m)$$

Coefficients

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	0.825549	0.134525	6.13679	0.000
VB (µm)	-0.010251	0.002903	-3.53102	0.003

Summary of Model

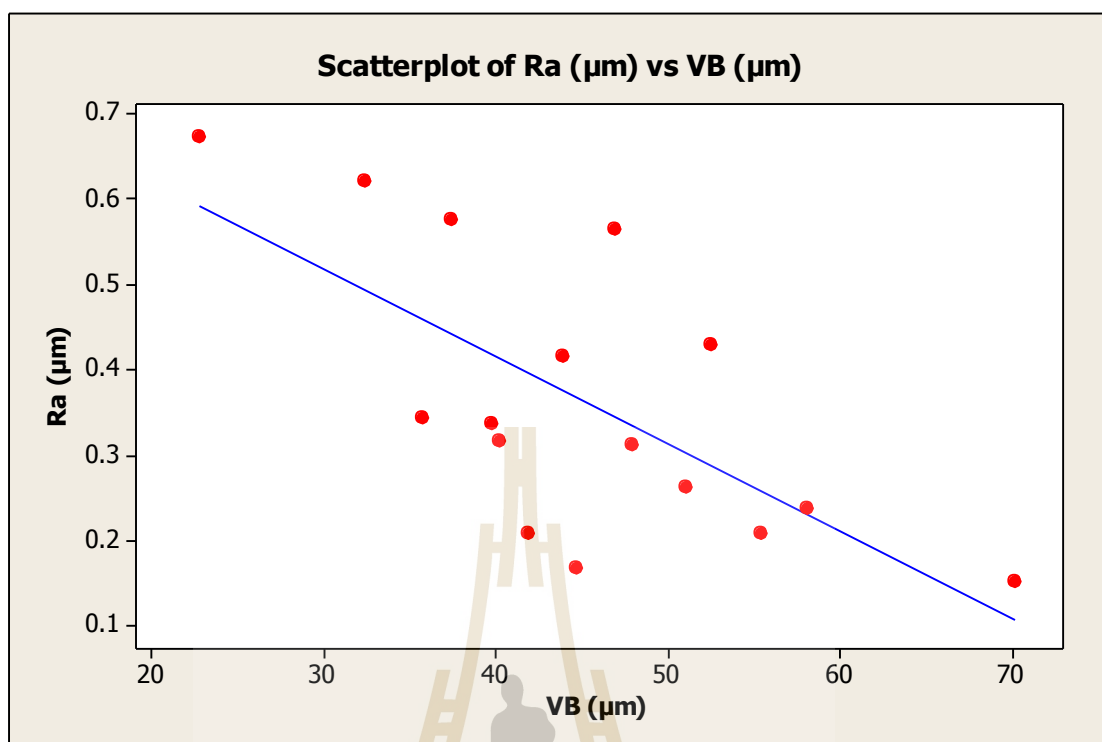
S = 0.125814 R-Sq = 47.11% R-Sq(adj) = 43.33%

PRESS = 0.272372 R-Sq(pred) = 34.99%

Analysis of Variance

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	1	0.197360	0.197360	0.197360	12.4681	0.0033239
VB (µm)	1	0.197360	0.197360	0.197360	12.4681	0.0033239
Error	14	0.221608	0.221608	0.015829		
Total	15	0.418968				

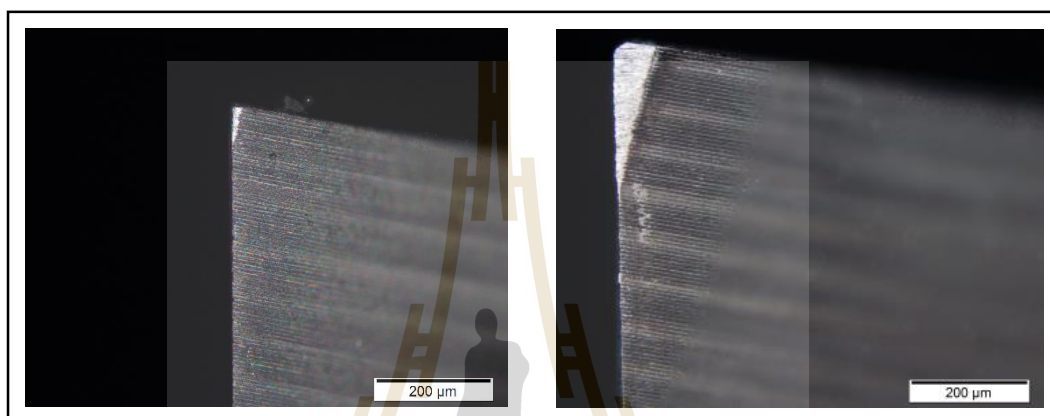
รูปที่ 4.5 ผลการวิเคราะห์ General Regression ที่ได้จากโปรแกรม Minitab R16



รูปที่ 4.6 แผนภาพการกระจายตัวของข้อมูลระหว่างความหยาบผิวกับการสึกหรอของเครื่องมือตัด

จากรูปที่ 4.6 คือ แผนภาพการกระจายตัวของข้อมูลระหว่างความหยาบผิวกับการสึกหรอของเครื่องมือตัด โดยกำหนดให้แกน X เป็นการสึกหรอของเครื่องมือตัด และแกน Y เป็นความหยาบผิว จะเห็นได้ว่า ความชันให้ผลลัพธ์เป็นลบ จากรูปที่ 4.5 จะเห็นได้ว่าฟังก์ชันคณิตศาสตร์ที่แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างการสึกหรอของเครื่องมือตัดกับความหยาบผิว คือ $Y = -0.0102507X + 0.825549$ ที่ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ $R^2 = 47.11$ เปอร์เซ็นต์ หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งว่าการสึกหรอของเครื่องมือตัดกับความหยาบผิวมีความสัมพันธ์กัน โดยความหยาบผิว มีค่าเป็น -0.0102507 เท่าของการสึกหรอของเครื่องมือ เมื่อรวมกับค่าคงที่ 0.825549 และกราฟดังกล่าวแสดงให้เห็นได้ว่า เมื่อค่าการสึกหรอของเครื่องมือตัดมีมากขึ้น พบว่าค่าความหยาบผิวจะมีค่าลดลง เนื่องจากช่วงแรกของคมตัดใหม่ จะเกิดการพอกเศษบริเวณปลายของคมตัด เกิดการบุกรุกหยาบที่พอกกับชิ้นงาน ทำให้ค่าความหยาบผิวมากในช่วงแรก

โดยผลที่ได้นี้สามารถพิจารณาได้จากการรูปที่ 4.7 ลักษณะการพอกเศษ เห็นได้ว่าการพอกเศษของวัสดุชิ้นงานที่มีการแทนที่บริเวณการสึกหรอของคมตัด ส่งผลให้คมตัดมีลักษณะที่เอวและเกิดการขัดสีที่ผิวงานขณะทำการตัดเฉือน ทำให้ค่าความหยาบต่ำในทุก ๆ เงื่อนไขการทดลอง โดยมีลักษณะการพอกเศษของวัสดุชิ้นงานที่มีการแทนที่บริเวณการสึกหรอของคมตัดไปในทิศทางเดียวกัน



ก. รอบกัดที่ 1

ข. รอบกัดที่ 40

รูปที่ 4.7 การเทียบระหว่างลักษณะการพอกเศษแบบ ก.รอบที่ 1 กับ ข. รอบที่ 40

บทที่ 5

สรุปและอภิปรายผลการวิจัย

จากการคัดกรองปัจจัยที่มีอิทธิพลหลักต่อความหยาบผิวและการสึกหรอของเครื่องมือตัดในกระบวนการกัดวัสดุอลูมิเนียมหล่อแบบกึ่งของแข็ง A356 โดยปัจจัยที่ศึกษาประกอบด้วยปัจจัยในการตัดเนื้อ 4 ปัจจัย ได้แก่ อัตราป้อนต่อฟัน, ความเร็วรอบ, ความลึกของการตัดในแนวรัศมี และความลึกของการตัดในแนวแกน และปัจจัยที่เกี่ยวกับรูปร่างของเครื่องมือตัด 3 ปัจจัย ได้แก่ จำนวนคมตัด, มุมเกลียว และมุมคายเศษ ใช้วิธีการออกแบบการทดลองแบบแฟรคชัน $1/8$ ของ 2^k แฟคตอเรียล (The One-Eighth Fraction of The 2^k Design หรือ 2^{k-3} Factorial Design) เพื่อทำการคัดกรองปัจจัยทั้ง 7 ปัจจัย โดยอาศัยการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) จากโปรแกรม Minitab ซึ่งสามารถสรุปผลได้ ดังนี้

5.1 สรุปผลการทดลอง

จากการทดลองคัดกรองปัจจัยที่มีผลต่อความหยาบผิวและการสึกหรอของเครื่องมือตัดในกระบวนการกัดวัสดุอลูมิเนียมหล่อแบบกึ่งของแข็ง A356 สามารถสรุปผลได้ ดังนี้

5.1.1 การคัดกรองปัจจัยที่มีผลต่อความหยาบผิวในกระบวนการกัดวัสดุอลูมิเนียมหล่อแบบกึ่งของแข็ง A356

- ผลการวิเคราะห์อิทธิพลหลัก (Main Effects) จากตารางที่ 4.2 การวิเคราะห์ความแปรปรวน (analysis of variance, ANOVA) พบว่ามีปัจจัยทั้งหมด 5 ปัจจัยที่ส่งผลต่อความหยาบผิวอย่างมีนัยสำคัญที่ 0.05 โดยลำดับจากปัจจัยที่ส่งผลมากที่สุด ประกอบด้วย

- 1) อัตราป้อนต่อฟัน
- 2) จำนวนคมตัด
- 3) ความลึกของการตัดในแนวรัศมี
- 4) มุมคายเศษ
- 5) ความเร็วตัดเนื้อ

- ผลการวิเคราะห์อิทธิพลร่วม 2 ตัวแปร (Interaction) จากตารางที่ 4.2 การวิเคราะห์ความแปรปรวน (analysis of variance, ANOVA) พบว่ามีปัจจัยร่วมทั้งหมด 6 คู่ ที่มีผลต่อความหยาบผิวอย่างมีนัยสำคัญที่ 0.05 โดยลำดับจากปัจจัยที่ส่งผลมากที่สุด ประกอบด้วย

- 1) อัตราป้อนต่อพื้นที่*มุมคายเศษ
- 2) อัตราป้อนต่อพื้นที่*มุมเกลียว
- 3) อัตราป้อนต่อพื้นที่*ความเร็วตัดเฉือน
- 4) ความเร็วตัดเฉือน*ความลึกของการตัดในแนวรัศมี
- 5) อัตราป้อนต่อพื้นที่*ความลึกของการตัดในแนวรัศมี
- 6) อัตราป้อนต่อพื้นที่*จำนวนคมตัด

โดยในส่วนของการศึกษาอิทธิพลร่วม ควรทำการทดลองแบบ 2^k แฟกตอเรียล (2^k Full Factorial Design) เพิ่มในการทดลอง เพื่อยืนยันผลการวิเคราะห์ของอิทธิพลร่วมที่มีผลต่อความหยาบผิวและตรวจสอบว่าอิทธิพลร่วมต่าง ๆ มีผลต่อความหยาบผิวจริงหรือไม่

- สภาวะการตัดเฉือนที่ให้ค่าความหยาบผิวน้อยที่สุด คือ การทดลองตามมาตรฐานที่ 1 ประกอบด้วย อัตราป้อนต่อพื้นที่ 0.02 มิลลิเมตร/พื้นที่, ความเร็วตัดเฉือน 215 เมตร/นาที, ความลึกของการตัดในแนวรัศมี 3 มิลลิเมตร, ความลึกของการตัดในแนวแกน 0.4 มิลลิเมตร, จำนวนคมตัด 2 พื้นที่, มุมเกลียว 35 องศา และมุมคายเศษ 14 องศา ได้ค่าความหยาบผิว 0.151 ไมโครเมตร

5.1.2 การคัดกรองปัจจัยที่มีผลต่อการสึกหรอของเครื่องมือตัดในกระบวนการกัดวัสดุอลูมิเนียมหล่อแบบกึ่งของแข็ง A356

- ผลการวิเคราะห์ปัจจัยหลัก (Main Effects) จากตารางที่ 4.4 การวิเคราะห์ความแปรปรวน (analysis of variance, ANOVA) พบว่า มีปัจจัยทั้งหมด 4 ปัจจัยที่ส่งผลต่อการสึกหรอของเครื่องมือตัดอย่างมีนัยสำคัญที่ 0.05 โดยลำดับจากปัจจัยที่ส่งผลมากที่สุด ประกอบด้วย

- 1) จำนวนคมตัด
- 2) อัตราป้อนต่อพื้นที่
- 3) ความลึกของการตัดในแนวรัศมี
- 4) ความลึกของการตัดในแนวแกน

- สภาวะการตัดเฉือนที่ให้ค่าขนาดการสึกหรอบนผิวหลบมากที่สุด คือ การทดลองตามมาตรฐานที่ 12 ประกอบด้วย อัตราป้อนต่อพื้นที่ 0.04 มิลลิเมตร/พื้นที่, ความเร็วตัดเฉือน

245 เมตร/นาทีก, ความลึกของการตัดในแนวรัศมี 6 มิลลิเมตร, ความลึกของการตัดในแนวแกน 0.4 มิลลิเมตร, จำนวนคมตัด 2 ฟัน, มุมเกลียว 35 องศา และมุมคายเศษ 10 องศา ได้คำนวณค่าการสึกหรอบนผิวหกลบสูงสุดได้ 70.13 ไมโครเมตร

5.2 การอภิปรายผลการทดลอง

จากการทดลองศึกษาอิทธิพลของปัจจัยที่มีผลต่อความหยาบผิวและการสึกหรอของเครื่องมือตัดในกระบวนการกัดวัสดุอะลูมิเนียมหล่อแบบกึ่งของแข็ง A356 จากการวิจัยครั้งนี้ พบว่า

5.2.1 อัตราป้อนต่อฟัน จากการทดลองได้กำหนดไว้ที่ 2 ระดับ คือ 0.02 และ 0.04 มิลลิเมตร/ฟัน จากการวิเคราะห์ข้อมูลพบว่า อัตราป้อนต่อฟันมีผลต่อความหยาบผิวและการสึกหรอของเครื่องมือตัดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 พิจารณารัตราป้อนต่อฟันที่ระดับต่ำทำให้มีความหยาบผิวน้อยกว่าอัตราป้อนต่อฟันที่ระดับสูง ดังแสดงในรูปที่ 3.11 เนื่องจากการเดินป้อนตัดของเครื่องมือตัดที่ช้า ทำให้ความหนาของเศษตัดที่ออกมาปริมาณเศษขี้พินไม่หนาและไม่ไปอุดตันบริเวณด้านหน้าของดอกกัด จึงส่งผลให้ผิวชิ้นงานมีความเรียบมากขึ้น ในทางกลับกัน อัตราป้อนต่อฟันที่ระดับต่ำทำให้การสึกหรอของเครื่องมือตัดที่มากกว่าอัตราป้อนต่อฟันที่ระดับสูง เนื่องจากการเดินป้อนของเครื่องมือตัดที่ช้า นั้น จะทำให้เกิดการตัดเฉือนวัสดุเข้า ๆ ตรงบริเวณพื้นผิวเดิม ส่งผลให้เครื่องมือตัดเกิดความล้ามากกว่าการเดินป้อนของเครื่องมือตัดที่เร็ว ดังนั้นความความล้าจากอัตราป้อนต่อฟัน จึงเป็นเหตุทำให้การสึกหรอของเครื่องมือตัดเพิ่มมากขึ้น

5.2.2 ความเร็วตัดเฉือน จากการทดลองได้กำหนดไว้ที่ 2 ระดับ คือ 215 และ 245 เมตร/นาทีก จากการวิเคราะห์ข้อมูลพบว่า ความเร็วตัดเฉือนมีผลต่อความหยาบผิวอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 พิจารณาความเร็วตัดเฉือนต่อฟันที่ระดับสูง ทำให้มีความหยาบผิวน้อยกว่าความเร็วตัดเฉือนที่ระดับต่ำ เนื่องจากการหมุนตัดเฉือนวัสดุเข้า ๆ ตรงบริเวณพื้นผิวเดิม ซึ่งเปรียบเสมือนการขัดผิวงาน ทำให้ผิวชิ้นงานมีความเรียบมากขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 3.12

5.2.3 ความลึกของการตัดในแนวรัศมี จากการทดลองได้กำหนดไว้ที่ 2 ระดับ คือ 3 และ 6 มิลลิเมตร จากการวิเคราะห์ข้อมูลพบว่า ความลึกของการตัดในแนวรัศมีมีผลต่อความหยาบผิวอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 พิจารณาความลึกของการตัดในแนวรัศมีที่ระดับต่ำ ทำให้มีความหยาบผิวน้อยกว่าความลึกของการตัดในแนวรัศมีที่ระดับสูง เนื่องจากการหมุนตัดเฉือนวัสดุเข้า ๆ ตรงบริเวณพื้นผิวเดิมที่เลียดัดเฉือน ซึ่งเปรียบเสมือนการขัดผิวงาน ทำให้ผิวชิ้นงานมีความเรียบมากขึ้น ในทางกลับกันความลึกของการตัดในแนวรัศมีที่ระดับต่ำทำให้มีการสึกหรอของเครื่องมือตัดที่มากกว่าความลึกของการตัดในแนวรัศมีที่ระดับสูง เนื่องจากความลึกของการตัดใน

แนวรัศมีที่ระดับต่ำมีการหมุนตัดเฉือนวัสดุซ้ำ ๆ ตรงบริเวณพื้นผิวเดิม ส่งผลให้เครื่องมือตัดเกิดความล้ามากกว่าการความลึกของการตัดในแนวรัศมีที่ระดับสูง ดังนั้นความล้าจากความลึกของการตัดในแนวรัศมี จึงเป็นเหตุทำให้การสึกหรอของเครื่องมือตัดเพิ่มมากขึ้น

5.2.4 ความลึกของการตัดในแนวแกน จากการทดลองได้กำหนดไว้ที่ 2 ระดับ คือ 0.04 และ 0.08 มิลลิเมตร จากการวิเคราะห์ข้อมูลพบว่า ความลึกของการตัดในแนวแกนมีผลต่อการสึกหรอของเครื่องมือตัด อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 พิจารณาความลึกของการตัดในแนวแกนที่ระดับต่ำ ทำให้มีการสึกหรอของเครื่องมือตัดที่มากกว่าความลึกของการตัดในแนวแกนที่ระดับสูง เนื่องจากความลึกในการตัดส่งผลต่อเศษตัดเฉือน โดยเศษตัดเฉือนวัสดุที่เล็กและมีเศษตัดเฉือนวัสดุที่เป็นฝุ่นผงนั้น ส่งผลให้เกิดการพอกเศษ (Built-Up Edge) คือ ฝุ่นผงของวัสดุมาเชื่อมติดกับผิวเครื่องมือกลและทับถมเป็นชั้นขึ้นมา โดยปริมาณการพอกที่หนาเกินไปหรือไม่มีเสถียรภาพทางเคมี จะทำให้แรงกดของเครื่องมือเพิ่มขึ้น อาจทำให้เครื่องมือแตกหัก

5.2.5 จำนวนคมตัด จากการทดลองได้กำหนดไว้ที่ 2 ระดับ คือ 2 และ 3 ฟัน จากการวิเคราะห์ข้อมูลพบว่า จำนวนคมตัด มีผลต่อความหยาบผิวและการสึกหรอของเครื่องมือตัดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 พิจารณาจำนวนคมตัดที่ระดับต่ำ ทำให้มีความหยาบผิวที่น้อยกว่าจำนวนคมตัดที่ระดับสูง เนื่องจากดอกกัด 2 ฟันนั้นมีพื้นที่ในการคายเศษตัดมากกว่าดอกกัด 3 ฟัน ซึ่งพื้นที่ในการคายเศษเป็นสิ่งจำเป็นสำหรับการตัดเฉือนวัสดุอุณหภูมิต่ำอย่างมาก เพราะจะส่งผลโดยตรงกับความหยาบผิว ในทางกลับกันจำนวนคมตัดที่ระดับต่ำทำให้การสึกหรอของเครื่องมือตัดที่มากกว่าจำนวนคมตัดที่ระดับสูง เนื่องจากเครื่องมือตัดในการป้อนตัด 1 รอบ ของคมตัด 2 ฟัน จะทำการตัดเฉือนวัสดุ 2 ครั้งต่อ 1 รอบ ส่งผลให้แรงในตัดเฉือนนั้นเพิ่มมากขึ้น จึงเป็นเหตุทำให้การสึกหรอของเครื่องมือตัดมากกว่าคมตัด 3 ฟัน

5.2.6 มุมคายเศษ จากการทดลองได้กำหนดไว้ที่ 2 ระดับ คือ 10 และ 14 องศา จากการวิเคราะห์ข้อมูลพบว่า มุมคายเศษมีผลต่อความหยาบผิวอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 พิจารณามุมคายเศษที่ระดับต่ำ ทำให้มีความหยาบผิวที่น้อยกว่ามุมคายเศษที่ระดับสูง เนื่องจากมุมคายเศษที่ระดับสูงนั้น เศษตัดเฉือนมีการเคลื่อนที่คายออกจากผิวงานและไปทับถมบริเวณคมตัด จึงส่งผลให้ผิวชิ้นงานไม่ดี

5.2.7 มุมเกลียว จากการทดลองพบว่าไม่ส่งผลต่อความหยาบผิวและการสึกหรอของเครื่องมือตัด เนื่องจากการกำหนดขอบเขตระยะห่างของระดับค่าของปัจจัยอาจจะต่างกันน้อยเกินไปและระดับค่าของปัจจัยอยู่ในช่วงที่เหมาะสมกับการตัดเฉือนแล้ว

5.3 ข้อเสนอแนะ

5.3.1 งานวิจัยนี้ศึกษาเพื่อคัดกรองปัจจัยที่มีอิทธิพลหลักต่อความหยาบผิวและการสึกหรอของเครื่องมือตัด สามารถนำไปศึกษาต่อในส่วนของอิทธิพลร่วม โดยการทำการทดลองแบบ 2^k แฟกตอเรียล (2^k Full Factorial Design)

5.3.2 สามารถนำสภาวะการตัดเฉือนที่ได้ผลความหยาบผิวต่ำไปใช้จริงในกระบวนการกัดปาดหน้าอู่นิยมหล่อแบบกึ่งของแข็ง A356

5.3.3 ผู้ที่สนใจจะศึกษางานวิจัยทางด้านนี้ สามารถนำข้อมูลจากวิทยานิพนธ์เรื่องนี้ไปศึกษาวิจัยต่อ เพื่อหาสมการพยากรณ์สภาวะที่เหมาะสมของ ความหยาบผิวและการสึกหรอของเครื่องมือตัดสำหรับกระบวนการกัดปาดหน้าอู่นิยมหล่อแบบกึ่งของแข็ง A356



รายการอ้างอิง

- ณรงค์ศักดิ์ ธรรมโชติ (2556). โลหะวิทยา. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- เจษฎา วรรณสินธุ์. (2009). การหล่อโลหะโดยใช้กรรมวิธี **Semi - Solid** ด้วยกระบวนการ **Gas Induce Semi- Solid**. คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- เจนณรงค์ นาคเทวัญ. (2555). การเชื่อมเสียดทานแบบกวนอลูมิเนียมกึ่งของแข็งเกรด 7075. วิทยานิพนธ์. คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- รอมฎอน บุรพา. รังสินี แคนบุคต์. เจษฎา วรรณสินธุ์. (2552). การพัฒนากระบวนการผลิตโลหะกึ่งของแข็ง โดยการพ่นฟองแก๊สขณะแข็งตัวสำหรับอลูมิเนียมผสมเกรด A356. วิทยานิพนธ์. คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- เจษฎา วรรณสินธุ์. (2554). เทคนิคการหล่ออลูมิเนียมแบบกึ่งของแข็ง. ศูนย์เทคโนโลยีและวัสดุแห่งชาติ, สมาคมอุตสาหกรรมหล่อโลหะไทย. หน้าที่ 48-53.
- ศิริกุล วิสุทธิ์เมธางกูร. สิริพร ชันทองคำ. (2552). อิทธิพลของตัวแปรในกระบวนการทางความร้อนที่มีผลต่อสมบัติทางกลและโครงสร้างจุลภาคของอลูมิเนียมหล่อแบบกึ่งของแข็ง A356. วิทยานิพนธ์. คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- พชร เกตุกราย. (2523). การหล่อโลหะ ภาคการผลิต. สมาคมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น) กรุงเทพมหานคร.
- วิจิตร พงษ์บัณฑิต. (2542). การหลอมละลาย และการปรับปรุงทางโลหะวิทยาของอะลูมิเนียมผสมกลุ่ม **Al - Si - Cu - Mg alloys LM25**. เทคโนโลยีการหล่อโลหะ ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ กรุงเทพมหานคร.
- Cerri E., Evangelista, E., Spigarelli, S., Cavaliere, P., and DeRiccardis, F. (2000). **Effects of Thermal Treatments on Microstructure and Mechanical Properties in a Thixocast 319 Aluminum Alloy**. Materials Science and Engineering A284. : 254-260.
- อำนาจ ทองแสน. (2559). ทฤษฎีเครื่องมือกล. กรุงเทพฯ : ซีเอ็ดดูเคชั่น. พิมพ์ครั้งที่ 1.
- ชาติ ตระการกุล. (2542). การเลือกใช้ลักษณะงานกัดระหว่างงานกัดตามและงานกัดทวน. หน้า 91-94.
- ปนัดดา นิรนาทล้ำพงศ์. (2545). การสึกหรอในงานอุตสาหกรรม. หน้า 171-180.
- Goldstein., Newbury., Joy., Lyman., Echlin., Lifshin., Sawyer., and Michael. **Scanning Electron Microscopy and X-Ray Microanalysis**. Third Edition. Springer Science.

ISO 4287 : 1997. **Standard Test Method for Surface Roughness Measurement**. Annual Book of ISO Standards.

ISO 3685 : 1993 (E) . **Standard Test Method for Flank Wear Measurement**. Annual Book of ISO Standards.

ปารเมศ ชุติมา. (2545). **การออกแบบการทดลองทางวิศวกรรม**. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

Montgomery, DC., (2009). **Design and Analysis of Experiments**, 7th ed. John Wiley& Sons, New York.

พิสมัย หาญมงคลพิพัฒน์. (2550). **สถิติและการวางแผนการทดลองทางเกษตร**. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

Rawangwong, S., Chatthong, J., Boonchouytan, W., and Burapa, R. (2013). **An Investigation of Optimum Cutting Conditions in Face Milling Semi-Solid Cast 6061 Aluminum Alloy Using Carbide Tool**. Advanced Materials Research. 747 : 777-78.

Rawangwong, S., Chatthong, J., Boonchouytan, W., and Burapa, R. (2013). **An Investigation of Optimum Cutting Conditions in Face Milling Aluminum Semi Solid 2024 Using Carbide Tool**. Energy Procedia. 34 : 854–862.

Rawangwong, S., Chatthong, J., Boonchouytan, W., and Burapa, R. (2014). **Influence of Cutting Parameters in Face Milling Semi-Solid AA 7075 Using Carbide Tool Affected the Surface Roughness and Tool Wear**. Energy Procedia. 56 : 448–457.

Subramanian, M., Sakthivel, M., Sudhakaran, R. (2014). **Modeling Analysis of Surface Roughness of AL7075-T6 in End Milling Process Using Response Surface Methodology**. Arab J Sci. Eng. 39 : 7299–7313.

Rezvani, E., Ghayour, H., and Kasiri, K. (2016). **Effect of cutting speed parameters on the surface roughness of Al5083 due to recrystallization**. Mechanical Sciences. 7 : 85-91.

Anthony Xavier, M., and Adithan, M. (2009). **Determining the Influence of Cutting Fluids on Tool Wear and Surface Roughness during Turning of AISI 304 Austenitic Stainless Steel**. Journal of Materials Processing Technology. 209 (2) : 900-909.

Sivasakthivel, P.S., Velmurugan, V., and Sudhakaran. R. (2010). **Prediction of Tool Wear from Machining Parameters by Response Surface Methodology in End Milling**. International Journal of Engineering Science and Technology. 2(6) : 1780-1789.

Aouici, H., Yallese, M.A., Findes, B., and Mabrouki, T. (2011). **Machinability investigation in hard turning of AISI H11 hot work steel with CBN tool**. Mechanics. 86(6) : 71-77.

Arokiadass, R., Palaniradja, K., and Alagumoorthi, N. (2012). **Prediction and optimization of end milling process parameters of cast aluminium based MMC**. Trans Nonferrous Met Soc China. 22 : 1568-1574.





ภาคผนวก ก

ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบความหยาบผิวของอูมิเนียมหล่อแบบ

กึ่งของแข็งหมายเลข A356

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ ก.1 ผลการวัดค่าความหยาบผิวของระดับค่าปัจจัยของอัตราป้อนต่อฟัน

ตำแหน่งที่	ค่าความหยาบผิว (Ra: ไมโครเมตร)							
	อัตราป้อนต่อฟัน (เมตร/นาที)							
	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08
1	0.181	0.165	0.196	0.225	0.513	0.435	0.765	0.92
2	0.135	0.179	0.179	0.322	0.553	0.537	0.768	0.919
3	0.171	0.168	0.197	0.361	0.432	0.466	0.827	0.989
4	0.105	0.153	0.242	0.237	0.501	0.473	0.606	0.953
5	0.158	0.168	0.186	0.316	0.43	0.424	0.797	0.916
6	0.139	0.147	0.196	0.237	0.512	0.533	0.765	0.991
7	0.224	0.177	0.261	0.258	0.532	0.457	0.735	1.047
8	0.151	0.178	0.215	0.259	0.444	0.469	0.623	0.969
9	0.176	0.163	0.206	0.296	0.516	0.544	0.773	0.962
10	0.132	0.188	0.288	0.366	0.331	0.451	0.789	1.017
11	0.182	0.173	0.265	0.281	0.55	0.445	0.725	1.006
12	0.136	0.170	0.191	0.257	0.482	0.46	0.808	1.048
13	0.142	0.137	0.239	0.378	0.341	0.512	0.773	1.012
14	0.132	0.144	0.255	0.442	0.493	0.505	0.792	0.961
15	0.126	0.155	0.188	0.328	0.41	0.462	0.729	1.029
16	0.139	0.155	0.290	0.275	0.306	0.486	0.819	0.99
17	0.141	0.184	0.198	0.315	0.533	0.485	0.833	1.03
18	0.142	0.180	0.174	0.293	0.419	0.595	0.605	0.915
19	0.146	0.154	0.304	0.274	0.435	0.481	0.764	0.931
20	0.155	0.158	0.240	0.341	0.516	0.501	0.735	1.033
ค่าเฉลี่ย	0.151	0.165	0.226	0.303	0.462	0.486	0.752	0.982

ตารางที่ ก.2 ผลการวัดค่าความหยาบผิวของระดับค่าปัจจัยของความเร็วดัดเฉือน

ตำแหน่งที่	ค่าความหยาบผิว (Ra: ไมโครเมตร)							
	ความเร็วดัดเฉือน (เมตร/นาทีก)							
	190	200	210	220	230	240	250	260
1	0.614	0.393	0.365	0.241	0.363	0.260	0.351	0.452
2	0.648	0.437	0.382	0.297	0.321	0.344	0.339	0.455
3	0.626	0.458	0.349	0.329	0.385	0.336	0.328	0.419
4	0.665	0.395	0.347	0.291	0.308	0.344	0.277	0.400
5	0.557	0.337	0.371	0.246	0.303	0.277	0.245	0.471
6	0.588	0.484	0.329	0.341	0.388	0.372	0.323	0.435
7	0.608	0.440	0.344	0.356	0.301	0.347	0.339	0.357
8	0.604	0.474	0.395	0.364	0.272	0.266	0.294	0.430
9	0.685	0.505	0.359	0.288	0.346	0.255	0.250	0.409
10	0.672	0.531	0.339	0.345	0.315	0.207	0.201	0.285
11	0.689	0.391	0.402	0.375	0.337	0.332	0.364	0.474
12	0.587	0.325	0.350	0.281	0.383	0.225	0.340	0.477
13	0.637	0.363	0.314	0.359	0.329	0.361	0.357	0.493
14	0.693	0.375	0.334	0.238	0.325	0.362	0.262	0.468
15	0.621	0.349	0.408	0.303	0.345	0.344	0.377	0.458
16	0.634	0.392	0.362	0.260	0.370	0.236	0.295	0.489
17	0.593	0.439	0.389	0.335	0.334	0.254	0.234	0.440
18	0.608	0.368	0.359	0.358	0.298	0.295	0.336	0.462
19	0.584	0.458	0.408	0.315	0.287	0.291	0.326	0.390
20	0.578	0.508	0.352	0.384	0.303	0.275	0.314	0.265
ค่าเฉลี่ย	0.625	0.421	0.363	0.315	0.331	0.299	0.308	0.426

ตารางที่ ก.3 ผลการวัดค่าความหยาบผิวของระดับค่าปัจจัยของมุมคายเศษ

ตำแหน่งที่	ค่าความหยาบผิว (Ra: ไมโครเมตร)					
	มุมคายเศษ (องศา)					
	8	10	12	14	16	18
1	0.382	0.403	0.382	0.403	0.347	0.357
2	0.343	0.469	0.347	0.381	0.354	0.314
3	0.359	0.433	0.392	0.361	0.333	0.343
4	0.408	0.467	0.369	0.379	0.346	0.342
5	0.385	0.477	0.329	0.401	0.372	0.299
6	0.371	0.468	0.341	0.395	0.381	0.33
7	0.389	0.473	0.359	0.291	0.372	0.342
8	0.388	0.481	0.354	0.321	0.397	0.343
9	0.383	0.419	0.336	0.336	0.333	0.285
10	0.373	0.385	0.263	0.385	0.342	0.281
11	0.397	0.453	0.351	0.372	0.347	0.362
12	0.337	0.429	0.353	0.375	0.376	0.351
13	0.345	0.467	0.336	0.365	0.345	0.353
14	0.379	0.459	0.315	0.304	0.329	0.294
15	0.352	0.426	0.333	0.297	0.323	0.342
16	0.404	0.398	0.22	0.345	0.375	0.322
17	0.391	0.365	0.329	0.301	0.352	0.288
18	0.436	0.418	0.318	0.337	0.341	0.283
19	0.336	0.354	0.335	0.344	0.352	0.303
20	0.35	0.425	0.318	0.283	0.332	0.322
21	0.425	0.437	0.294	0.361	0.341	0.301
22	0.365	0.343	0.302	0.428	0.369	0.415
23	0.355	0.367	0.309	0.401	0.344	0.398
24	0.318	0.329	0.353	0.353	0.383	0.401
ค่าเฉลี่ย	0.374	0.423	0.331	0.355	0.354	0.332

ตารางที่ ก.4 ผลการวัดค่าความหยาบผิวของการทดลองที่ 1-8

ตำแหน่งที่	ค่าความหยาบผิว (Ra: ไมโครเมตร)							
	การทดลองที่							
	1	2	3	4	5	6	7	8
1	0.113	0.467	0.185	0.386	0.216	0.309	0.235	0.436
2	0.130	0.473	0.244	0.422	0.228	0.241	0.246	0.460
3	0.136	0.507	0.243	0.403	0.278	0.375	0.256	0.443
4	0.134	0.624	0.276	0.446	0.215	0.304	0.258	0.433
5	0.162	0.606	0.249	0.486	0.218	0.384	0.249	0.39
6	0.158	0.575	0.266	0.425	0.254	0.337	0.288	0.422
7	0.101	0.548	0.282	0.530	0.217	0.352	0.315	0.367
8	0.158	0.634	0.288	0.448	0.218	0.314	0.29	0.385
9	0.155	0.631	0.269	0.414	0.224	0.371	0.246	0.391
10	0.132	0.567	0.255	0.530	0.188	0.297	0.423	0.403
11	0.157	0.556	0.234	0.568	0.213	0.326	0.227	0.418
12	0.145	0.636	0.262	0.412	0.210	0.327	0.194	0.365
13	0.125	0.629	0.264	0.518	0.204	0.288	0.260	0.429
14	0.117	0.525	0.264	0.318	0.229	0.391	0.220	0.430
15	0.162	0.620	0.285	0.428	0.194	0.389	0.197	0.434
16	0.137	0.460	0.308	0.436	0.200	0.35	0.198	0.407
17	0.136	0.586	0.290	0.320	0.180	0.372	0.202	0.420
18	0.184	0.578	0.316	0.518	0.207	0.323	0.243	0.409
19	0.135	0.552	0.291	0.412	0.207	0.350	0.168	0.437
20	0.152	0.593	0.270	0.315	0.176	0.316	0.232	0.386
21	0.177	0.509	0.262	0.589	0.171	0.355	0.214	0.420
22	0.150	0.571	0.238	0.270	0.184	0.346	0.192	0.389
23	0.296	0.495	0.209	0.267	0.198	0.421	0.144	0.469
24	0.162	0.593	0.240	0.427	0.173	0.419	0.189	0.423
ค่าเฉลี่ย	0.151	0.564	0.262	0.429	0.208	0.344	0.237	0.415

ตารางที่ ก.5 ผลการวัดค่าความหยาบผิวของการทดลองที่ 9-16

ตำแหน่งที่	ค่าความหยาบผิว (Ra: ไมโครเมตร)							
	การทดลองที่							
	9	10	11	12	13	14	15	16
1	0.152	0.658	0.303	0.346	0.331	0.484	0.192	0.614
2	0.170	0.597	0.333	0.310	0.394	0.547	0.217	0.586
3	0.186	0.596	0.435	0.347	0.335	0.376	0.168	0.565
4	0.180	0.633	0.308	0.255	0.341	0.559	0.234	0.766
5	0.240	0.643	0.407	0.263	0.348	0.644	0.171	0.810
6	0.229	0.637	0.401	0.257	0.312	0.656	0.212	0.777
7	0.202	0.676	0.353	0.312	0.293	0.559	0.186	0.754
8	0.188	0.621	0.390	0.291	0.337	0.534	0.147	0.737
9	0.237	0.642	0.397	0.313	0.357	0.635	0.170	0.777
10	0.207	0.595	0.440	0.266	0.266	0.540	0.194	0.771
11	0.182	0.569	0.227	0.280	0.220	0.537	0.154	0.744
12	0.281	0.623	0.384	0.293	0.306	0.613	0.142	0.677
13	0.169	0.592	0.359	0.333	0.345	0.551	0.168	0.621
14	0.241	0.642	0.298	0.308	0.334	0.690	0.157	0.635
15	0.268	0.601	0.377	0.365	0.347	0.549	0.156	0.604
16	0.175	0.685	0.255	0.329	0.278	0.546	0.150	0.555
17	0.274	0.661	0.283	0.316	0.272	0.665	0.128	0.572
18	0.251	0.551	0.278	0.329	0.315	0.556	0.144	0.533
19	0.140	0.607	0.271	0.319	0.335	0.525	0.178	0.612
20	0.196	0.693	0.315	0.360	0.335	0.669	0.170	0.686
21	0.262	0.667	0.303	0.336	0.355	0.585	0.149	0.624
22	0.180	0.585	0.360	0.279	0.307	0.650	0.131	0.707
23	0.195	0.634	0.309	0.344	0.272	0.666	0.149	0.652
24	0.201	0.505	0.310	0.321	0.243	0.492	0.132	0.763
ค่าเฉลี่ย	0.209	0.621	0.337	0.311	0.316	0.576	0.167	0.673

ภาคผนวก ข

ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบขนาดการสึกหรอของเครื่องมือตัด

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ ข.1 ผลการวัดขนาดการสึกหรอบนผิวหلبของการทดลองที่ 1-16

ที่จำนวนการตัดเฉือน 10 รอบ (1 รอบ : 480 ตร.มม.)

การทดลองที่	ขนาดการสึกหรอบนผิวหلب (VB: ไมโครเมตร)				
	คมตัดที่ 1	คมตัดที่ 2	คมตัดที่ 3	ค่าเฉลี่ย	ค่าสูงสุด
1	50.96	51.34		51.15	51.34
2	33.12	32.88	27.22	31.07	33.12
3	100.62	28.29	36.14	32.22	36.14
4	23.78	29.24		26.51	29.24
5	27.13	24.43	19.62	23.73	27.13
6	29.27	35.55		32.41	35.55
7	47.31	55.34		51.33	55.34
8	31.6	36.89	31.19	33.23	36.89
9	34.73	33.62		34.18	34.73
10	23.11	22.38	17.01	20.83	23.11
11	22.51	28.72	23.99	25.07	28.72
12	30.19	28.71		29.45	30.19
13	29.78	24.29	37.71	30.59	37.71
14	27.62	26.84		27.23	27.62
15	28.37	24.67		26.52	28.37
16	18.89	16.91	18.65	18.15	18.89

ตารางที่ ข.2 ผลการวัดขนาดการสีกหรอบบนผิวหลบของการทดลองที่ 1-16

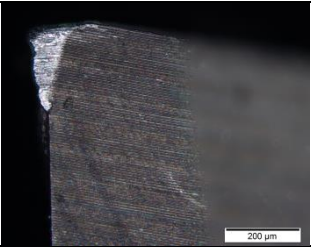
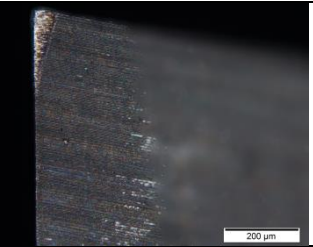
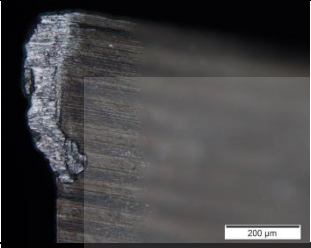
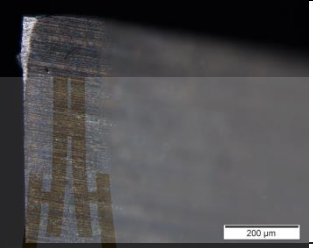
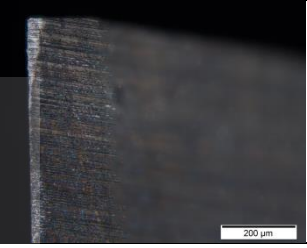
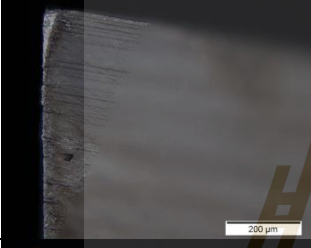

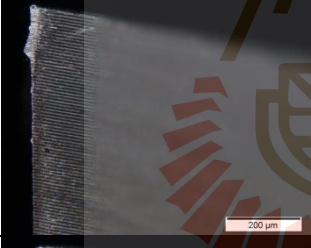

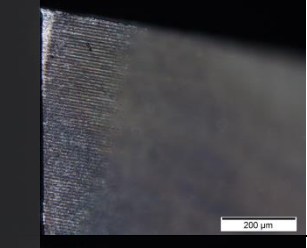
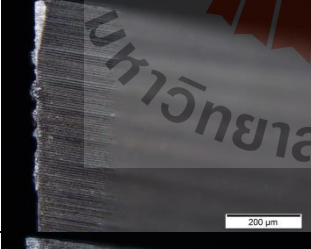

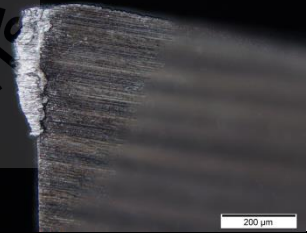
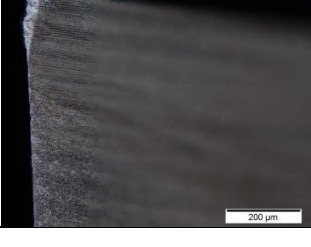
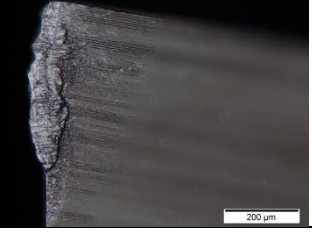
ที่จำนวนการตัดเนือน 40 รอบ (1 รอบ : 480 ตร.มม.)

การทดลองที่	ขนาดการสีกหรอบบนผิวหลบ (VB: ไมโครเมตร)				
	คมตัดที่ 1	คมตัดที่ 2	คมตัดที่ 3	ค่าเฉลี่ย	ค่าสูงสุด
1	70.13	69.6		69.87	70.13
2	43.36	46.94	40.77	43.69	46.94
3	145.25	50.85	51.05	50.95	51.05
4	45.49	52.55		49.02	52.55
5	-	36.69	41.91	39.30	41.91
6	34.58	35.73		35.16	35.73
7	57.37	58.09		57.73	58.09
8	34.15	37.6	43.89	38.55	43.89
9	55.44	55.11		55.28	55.44
10	25.35	28.49	32.31	28.72	32.31
11	21.99	39.73	34.98	32.23	39.73
12	47.95	31.00		39.48	47.95
13	37.86	40.25	38.19	38.77	40.25
14	32.77	37.44		35.11	37.44
15	44.72	37.07		40.90	44.72
16	21.53	21.69	22.75	21.99	22.75

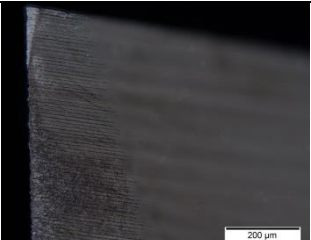
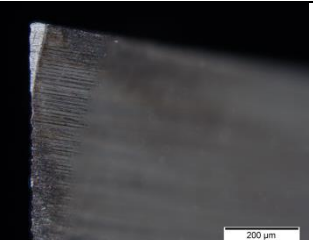

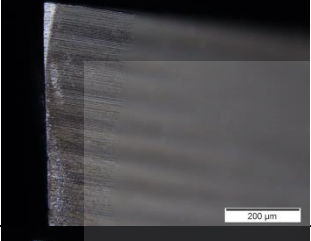

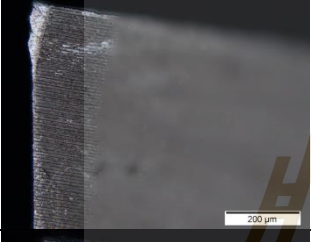
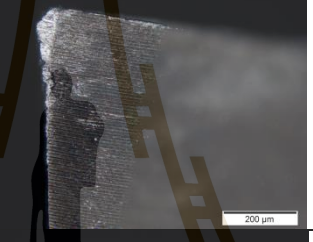


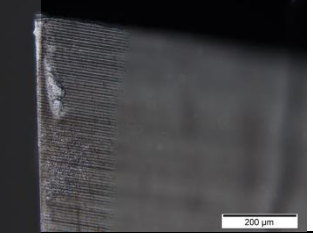
ตารางที่ ข.3 ผลแสดงการสึกหรอของเครื่องมือตัดของการทดลองที่ 1-6

STD	คมตัดที่ 1	คมตัดที่ 2	คมตัดที่ 3
1			
2			
3			
4			
5			
6			

ตารางที่ ข.3 ผลแสดงการสึกหรอของเครื่องมือตัดของการทดลองที่ 7-12

STD	คมตัดที่ 1	คมตัดที่ 2	คมตัดที่ 3
7			
8			
9			
10			
11			
12			

ตารางที่ ข.3 ผลแสดงการสึกหรอของเครื่องมือตัดของการทดลองที่ 13-16

STD	คมตัดที่ 1	คมตัดที่ 2	คมตัดที่ 3
13			
14			
15			
16			



ภาคผนวก ค

ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบส่วนผสมทางเคมีของ

อลูมิเนียมหล่อแบบกึ่งของแข็งหมายเลข A356

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ ค.1 ส่วนผสมทางเคมีของอลูมิเนียมหล่อแบบกึ่งของแข็งหมายเลข A356

 SPECTRO	1/6/2559 14:12:10
---	-------------------

Method: AI-20

Comment: Al/Si-alloys

1/6/2559 14:11:47

Element concentration

Sample Name: 0:

A356-T6

	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn
	%	%	%	%	%	%	%	%
1	7.29	0.113	0.0201	0.0046	0.216	0.00030	0.0054	0.0099
2	7.14	0.108	0.0196	0.0046	0.215	0.00030	0.0053	0.0083
3	7.11	0.102	0.0195	0.0043	0.215	0.00040	0.0053	0.0083
< x > (3)	7.18	0.108	0.0197	0.0045	0.215	0.00033	0.0053	0.0089
sd	0.0983	0.0057	0.00032	0.00019	0.00051	0.00006	0.00010	0.00092
rsd	1.4	5.3	1.6	4.3	0.2	17.0	1.9	10.4

	Ti	Be	Bi	Ca	Co	Ga	Na	P
	%	%	%	%	%	%	%	%
1	0.119	< 0.00001	< 0.00010	0.0021	0.0013	0.0097	0.0090	< 0.00020
2	0.111	< 0.00001	< 0.00010	0.00042	0.0013	0.0098	0.0043	< 0.00020
3	0.105	< 0.00001	< 0.00010	0.00014	0.0013	0.0099	0.0054	< 0.00020
< x > (3)	0.112	< 0.00001	< 0.00010	0.00087	0.0013	0.0098	0.0062	< 0.00020
sd	0.0068	0.00000	0.00000	0.0010	0.00001	0.00014	0.0024	0.00000
rsd	6.1	0.0	0.0	118.1	0.8	1.5	39.1	0.0

	Pb	Sn	Sr	V	Zr	Al		
	%	%	%	%	%	%		
1	0.0148	< 0.00020	0.00001	0.0131	0.0040	92.2		
2	0.0121	< 0.00020	< 0.00001	0.0125	0.0032	92.3		
3	0.0098	< 0.00020	< 0.00001	0.0122	0.0031	92.4		
< x > (3)	0.0122	< 0.00020	0.00001	0.0126	0.0035	92.3		
sd	0.0025	0.00000	0.00000	0.00047	0.00048	0.118		
rsd	20.6	0.0	1.1	3.7	13.9	0.1		

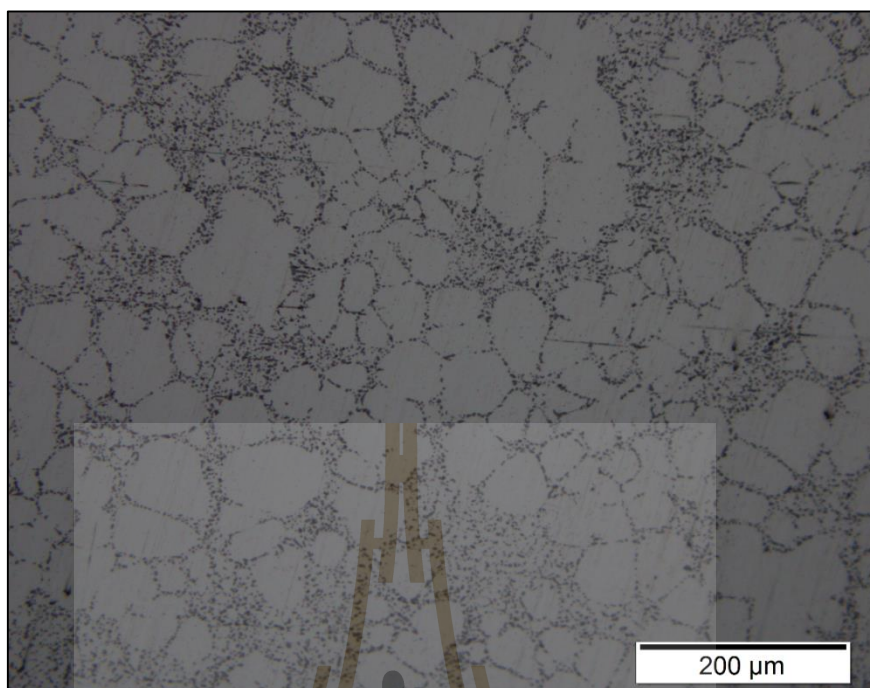
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

The logo of Sakon Nakhon Rajabhat University is a large, faint watermark in the background. It features a central figure of a person sitting on a throne, surrounded by a circular emblem with Thai script. Above the figure is a large, stylized Thai character 'น' (No) which forms a triangular shape.

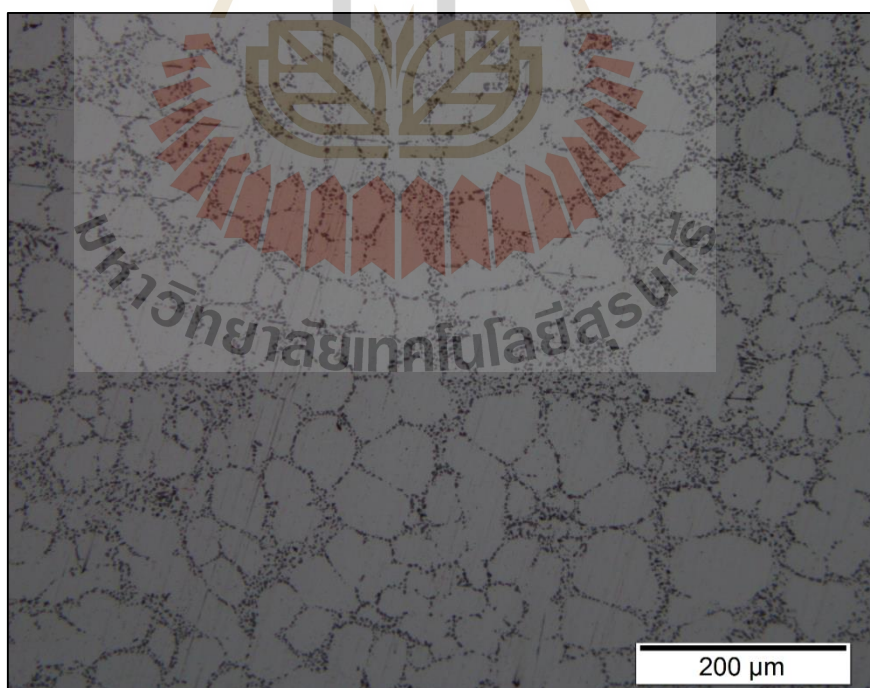
ภาคผนวก ง

ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบโครงสร้างจุดภาคของ
อลูมิเนียมหล่อแบบกึ่งของแข็งหมายเลข A356

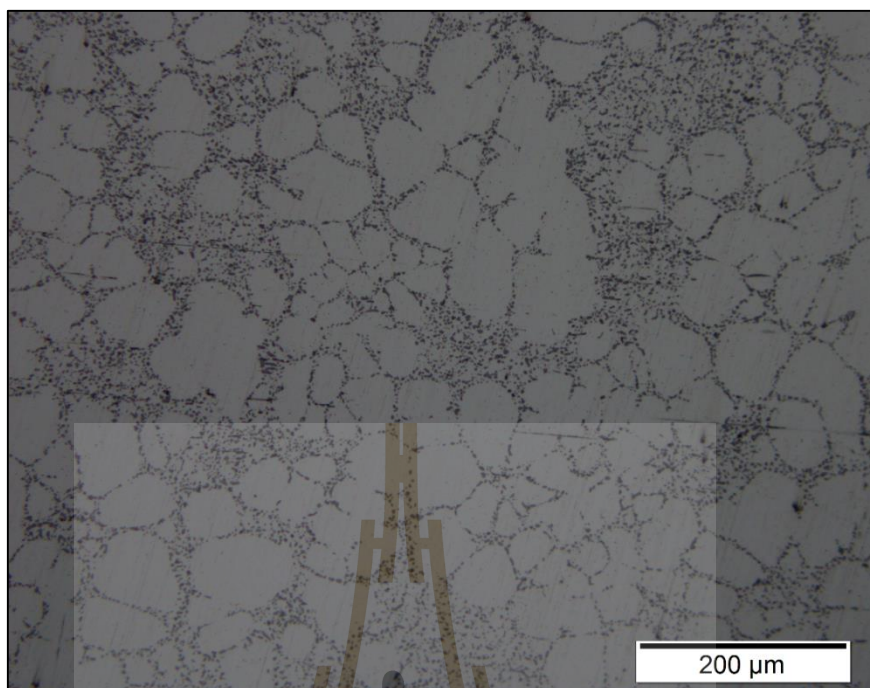
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



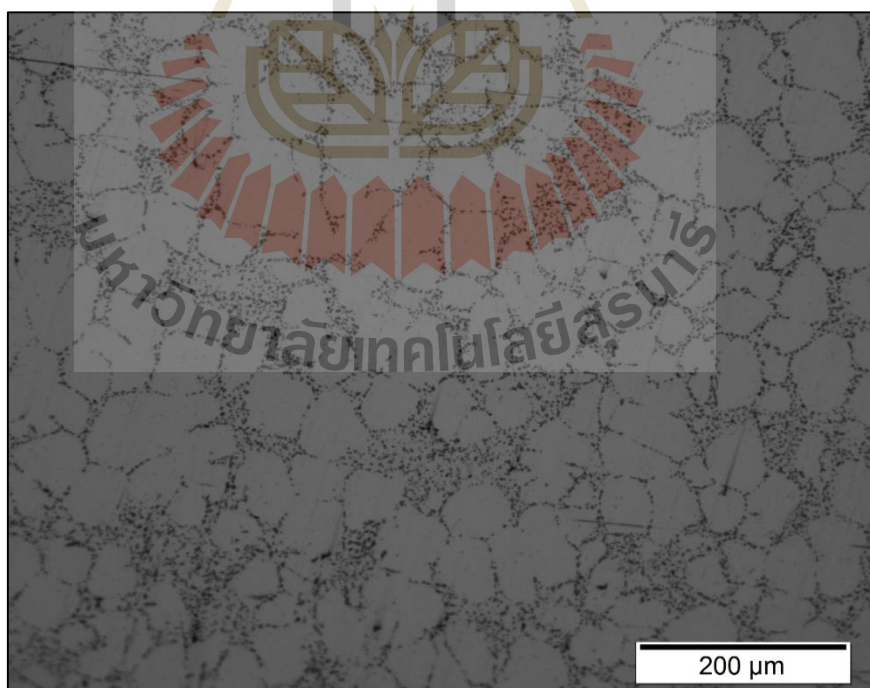
รูปที่ ง.1 โครงสร้างจุลภาคของอลูมิเนียมหล่อแบบกึ่งของแข็งหมายเลข A356



รูปที่ ง.2 โครงสร้างจุลภาคของอลูมิเนียมหล่อแบบกึ่งของแข็งหมายเลข A356



รูปที่ ง.3 โครงสร้างจุลภาคของอลูมิเนียมหล่อแบบกึ่งของแข็งหมายเลข A356



รูปที่ ง.4 โครงสร้างจุลภาคของอลูมิเนียมหล่อแบบกึ่งของแข็งหมายเลข A356

ภาคผนวก จ

การเขียนโค้ดโปรแกรมกระบวนการกักสำหรับเครื่องซีเอ็นซี

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

การเขียนโค้ดโปรแกรมกระบวนการกัดสำหรับเครื่องซีเอ็นซี

ในการทดลองงานวิจัยนี้ จำเป็นต้องทำการเขียนโค้ดโปรแกรมกระบวนการกัดอลูมิเนียมหล่อแบบกึ่งของแข็ง A356 เพื่อให้เครื่องมือตัดเคลื่อนที่ไปตามเส้นทางเดินกัดตามที่ต้องการ ซึ่งในงานวิจัยนี้มีการทดลองทั้งหมด 16 การทดลองได้เขียนโค้ดไว้ดังนี้

- การทดลองที่ 1 มีรายละเอียดปัจจัยที่ศึกษาประกอบด้วย ความเร็วรอบ 5,706 รอบต่อนาที อัตราการป้อน 228 มิลลิเมตรต่อนาที ความลึกของการตัดในแนวรัศมี 3 มิลลิเมตร และความลึกของการตัดในแนวแกน 0.4 มิลลิเมตร
- การทดลองที่ 2 มีรายละเอียดปัจจัยที่ศึกษาประกอบด้วย ความเร็วรอบ 5,706 รอบต่อนาที อัตราการป้อน 685 มิลลิเมตรต่อนาที ความลึกของการตัดในแนวรัศมี 3 มิลลิเมตร และความลึกของการตัดในแนวแกน 0.4 มิลลิเมตร
- การทดลองที่ 3 มีรายละเอียดปัจจัยที่ศึกษาประกอบด้วย ความเร็วรอบ 6,502 รอบต่อนาที อัตราการป้อน 390 มิลลิเมตรต่อนาที ความลึกของการตัดในแนวรัศมี 3 มิลลิเมตร และความลึกของการตัดในแนวแกน 0.4 มิลลิเมตร
- การทดลองที่ 4 มีรายละเอียดปัจจัยที่ศึกษาประกอบด้วย ความเร็วรอบ 6,502 รอบต่อนาที อัตราการป้อน 520 มิลลิเมตรต่อนาที ความลึกของการตัดในแนวรัศมี 3 มิลลิเมตร และความลึกของการตัดในแนวแกน 0.4 มิลลิเมตร
- การทดลองที่ 5 มีรายละเอียดปัจจัยที่ศึกษาประกอบด้วย ความเร็วรอบ 5,706 รอบต่อนาที อัตราการป้อน 342 มิลลิเมตรต่อนาที ความลึกของการตัดในแนวรัศมี 3 มิลลิเมตร และความลึกของการตัดในแนวแกน 0.8 มิลลิเมตร
- การทดลองที่ 6 มีรายละเอียดปัจจัยที่ศึกษาประกอบด้วย ความเร็วรอบ 5,706 รอบต่อนาที อัตราการป้อน 456 มิลลิเมตรต่อนาที ความลึกของการตัดในแนวรัศมี 3 มิลลิเมตร และความลึกของการตัดในแนวแกน 0.8 มิลลิเมตร
- การทดลองที่ 7 มีรายละเอียดปัจจัยที่ศึกษาประกอบด้วย ความเร็วรอบ 6,502 รอบต่อนาที อัตราการป้อน 260 มิลลิเมตรต่อนาที ความลึกของการตัดในแนวรัศมี 3 มิลลิเมตร และความลึกของการตัดในแนวแกน 0.4 มิลลิเมตร
- การทดลองที่ 8 มีรายละเอียดปัจจัยที่ศึกษาประกอบด้วย ความเร็วรอบ 6,502 รอบต่อนาที อัตราการป้อน 780 มิลลิเมตรต่อนาที ความลึกของการตัดในแนวรัศมี 3 มิลลิเมตร และความลึกของการตัดในแนวแกน 0.8 มิลลิเมตร

โดยการทดลองที่ 1-8 จะทำการลบค่าสั่งในบรรทัดที่ 4 ออก จากนั้นทำเดิมค่า S_____ คือ ค่าความเร็วรอบ ค่า Z-_____ คือ ค่าความลึกของการตัดในแนวแกน และค่า F_____ คือ ค่าอัตราการป้อนของแต่ละการทดลองลงไปในโค้ดโปรแกรมนี้

```

1 BEGIN PGM ชื่อไฟล์ MM
2 BLK FORM0.1 Z X0 Y0 Z0
3 BLK FORM0.2 X0 Y0 Z0
5 TOOL CALL 8 Z S_____
6 L R F M06
7 L X-9.0 Y-15.0 R FMAX M
8 L Z3.0 R FMAX M3
9 L Z-_____ R F500 M90
10 L Y106.0 R F_____ M90
11 L Z3.0 R FMAX M
12 L X-6.0 Y-15.0 R FMAX M
13 L Z-_____ R F500 M90
14 L Y106.0 R F_____ M90
15 L Z3.0 R FMAX M
16 L X-3.0 Y-15.0 R FMAX M
17 L Z-_____ R F500 M90
18 L Y106.0 R F_____ M90
19 L Z3.0 R FMAX M
20 L X0.0 Y-15.0 R FMAX M
21 L Z-_____ R F500 M90
22 L Y106.0 R F_____ M90
23 L Z3.0 R FMAX M
24 L X3.0 Y-15.0 R FMAX M
25 L Z-_____ R F500 M90
26 L Y106.0 R F_____ M90
27 L Z3.0 R FMAX M
28 L X6.0 Y-15.0 R FMAX M

```

- 29 L Z-_____ R F500 M90
- 30 L Y106.0 R F_____ M90
- 31 L Z3.0 R FMAX M
- 32 L X9.0 Y-15.0 R FMAX M
- 33 L Z-_____ R F500 M90
- 34 L Y106.0 R F_____ M90
- 35 L Z3.0 R FMAX M
- 36 L X12.0 Y-15.0 R FMAX M
- 37 L Z-_____ R F500 M90
- 38 L Y106.0 R F_____ M90
- 39 L Z3.0 R FMAX M
- 40 L X15.0 Y-15.0 R FMAX M
- 41 L Z-_____ R F500 M90
- 42 L Y106.0 R F_____ M90
- 43 L Z3.0 R FMAX M
- 44 L X18.0 Y-15.0 R FMAX M
- 45 L Z-_____ R F500 M90
- 46 L Y106.0 R F_____ M90
- 47 L Z3.0 R FMAX M
- 48 L X21.0 Y-15.0 R FMAX M
- 49 L Z-_____ R F500 M90
- 50 L Y106.0 R F_____ M90
- 51 L Z3.0 R FMAX M
- 52 L X24.0 Y-15.0 R FMAX M
- 53 L Z-_____ R F500 M90
- 54 L Y106.0 R F_____ M90
- 55 L Z3.0 R FMAX M
- 56 L X27.0 Y-15.0 R FMAX M
- 57 L Z-_____ R F500 M90
- 58 L Y106.0 R F_____ M90

59 L Z3.0 R FMAX M
 60 L X30.0 Y-15.0 R FMAX M
 61 L Z-_____ R F500 M90
 62 L Y106.0 R F_____ M90
 63 L Z3.0 R FMAX M
 64 L X33.0 Y-15.0 R FMAX M
 65 L Z-_____ R F500 M90
 66 L Y106.0 R F_____ M90
 67 L Z3.0 R FMAX M
 68 L X36.0 Y-15.0 R FMAX M
 69 L Z-_____ R F500 M90
 70 L Y106.0 R F_____ M90
 71 L Z3.0 R FMAX M
 72 L X39.0 Y-15.0 R FMAX M
 73 L Z-_____ R F500 M90
 74 L Y106.0 R F_____ M90
 75 L Z3.0 R FMAX M
 76 L X42.0 Y-15.0 R FMAX M
 77 L Z-_____ R F500 M90
 78 L Y106.0 R F_____ M90
 79 L Z3.0 R FMAX M
 80 L X45.0 Y-15.0 R FMAX M
 81 L Z-_____ R F500 M90
 82 L Y106.0 R F_____ M90
 83 L Z150.0 R0 FMAX
 84 L R F M30
 85 END PGM ชื่อไฟล์ MM

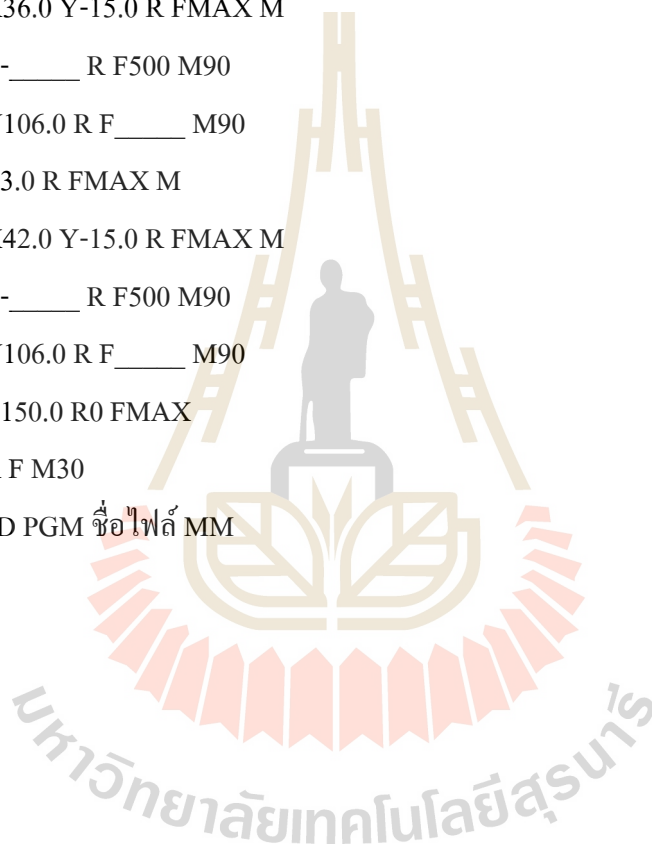
- การทดลองที่ 9 มีรายละเอียดปัจจัยที่ศึกษาประกอบด้วย ความเร็วรอบ 5,706 รอบต่อนาที อัตราการป้อน 228 มิลลิเมตรต่อนาที ความลึกของการตัดในแนวรัศมี 6 มิลลิเมตร และความลึกของการตัดในแนวแกน 0.4 มิลลิเมตร
- การทดลองที่ 10 มีรายละเอียดปัจจัยที่ศึกษาประกอบด้วย ความเร็วรอบ 5,706 รอบต่อนาที อัตราการป้อน 685 มิลลิเมตรต่อนาที ความลึกของการตัดในแนวรัศมี 6 มิลลิเมตร และความลึกของการตัดในแนวแกน 0.4 มิลลิเมตร
- การทดลองที่ 11 มีรายละเอียดปัจจัยที่ศึกษาประกอบด้วย ความเร็วรอบ 6,502 รอบต่อนาที อัตราการป้อน 390 มิลลิเมตรต่อนาที ความลึกของการตัดในแนวรัศมี 6 มิลลิเมตร และความลึกของการตัดในแนวแกน 0.4 มิลลิเมตร
- การทดลองที่ 12 มีรายละเอียดปัจจัยที่ศึกษาประกอบด้วย ความเร็วรอบ 6,502 รอบต่อนาที อัตราการป้อน 520 มิลลิเมตรต่อนาที ความลึกของการตัดในแนวรัศมี 6 มิลลิเมตร และความลึกของการตัดในแนวแกน 0.4 มิลลิเมตร
- การทดลองที่ 13 มีรายละเอียดปัจจัยที่ศึกษาประกอบด้วย ความเร็วรอบ 5,706 รอบต่อนาที อัตราการป้อน 342 มิลลิเมตรต่อนาที ความลึกของการตัดในแนวรัศมี 6 มิลลิเมตร และความลึกของการตัดในแนวแกน 0.8 มิลลิเมตร
- การทดลองที่ 14 มีรายละเอียดปัจจัยที่ศึกษาประกอบด้วย ความเร็วรอบ 5,706 รอบต่อนาที อัตราการป้อน 456 มิลลิเมตรต่อนาที ความลึกของการตัดในแนวรัศมี 6 มิลลิเมตร และความลึกของการตัดในแนวแกน 0.8 มิลลิเมตร
- การทดลองที่ 15 มีรายละเอียดปัจจัยที่ศึกษาประกอบด้วย ความเร็วรอบ 6,502 รอบต่อนาที อัตราการป้อน 260 มิลลิเมตรต่อนาที ความลึกของการตัดในแนวรัศมี 6 มิลลิเมตร และความลึกของการตัดในแนวแกน 0.8 มิลลิเมตร
- การทดลองที่ 16 มีรายละเอียดปัจจัยที่ศึกษาประกอบด้วย ความเร็วรอบ 6,502 รอบต่อนาที อัตราการป้อน 780 มิลลิเมตรต่อนาที ความลึกของการตัดในแนวรัศมี 6 มิลลิเมตร และความลึกของการตัดในแนวแกน 0.8 มิลลิเมตร

โดยการทดลองที่ 9-16 จะทำการลบค่าสั่งในบรรทัดที่ 4 ออก จากนั้นทำการเติมค่า S_____ คือ ค่าความเร็วรอบ ค่า Z-_____ คือ ค่าความลึกของการตัดในแนวแกน และค่า F_____ คือ ค่าอัตราการป้อนของแต่ละการทดลองลงไปในโค้ดโปรแกรมนี้

1 BEGIN PGM ชื่อไฟล์ MM

2 BLK FORM0.1 Z X0 Y0 Z0
3 BLK FORM0.2 X0 Y0 Z0
5 TOOL CALL 8 Z S5706
6 L R F M06
7 L X-12.0 Y-15.0 R FMAX M
8 L Z3.0 R FMAX M3
9 L Z-_____ R F500 M90
10 L Y106.0 R F_____ M90
11 L Z3.0 R FMAX M
12 L X-6.0 Y-15.0 R FMAX M
13 L Z-_____ R F500 M90
14 L Y106.0 R F_____ M90
15 L Z3.0 R FMAX M
16 L X0.0 Y-15.0 R FMAX M
17 L Z-_____ R F500 M90
18 L Y106.0 R F_____ M90
19 L Z3.0 R FMAX M
20 L X6.0 Y-15.0 R FMAX M
21 L Z-_____ R F500 M90
22 L Y106.0 R F_____ M90
23 L Z3.0 R FMAX M
24 L X12.0 Y-15.0 R FMAX M
25 L Z-_____ R F500 M90
26 L Y106.0 R F_____ M90
27 L Z3.0 R FMAX M
28 L X18.0 Y-15.0 R FMAX M
29 L Z-_____ R F500 M90
30 L Y106.0 R F_____ M90
31 L Z3.0 R FMAX M
32 L X24.0 Y-15.0 R FMAX M

33 L Z-____ R F500 M90
34 L Y106.0 R F____ M90
35 L Z3.0 R FMAX M
36 L X30.0 Y-15.0 R FMAX M
37 L Z-____ R F500 M90
38 L Y106.0 R F____ M90
39 L Z3.0 R FMAX M
40 L X36.0 Y-15.0 R FMAX M
41 L Z-____ R F500 M90
42 L Y106.0 R F____ M90
43 L Z3.0 R FMAX M
44 L X42.0 Y-15.0 R FMAX M
45 L Z-____ R F500 M90
46 L Y106.0 R F____ M90
47 L Z150.0 R0 FMAX
48 L R F M30
49 END PGM ชื่อไฟล์ MM





ภาคผนวก จ

บทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

รายชื่อบทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในขณะศึกษา

Prapaspong, A., Thanasuptawee, U., Aengchuan, P., and Siwadamrongpong, S. (2017). **The study of machining parameters on surface roughness in the end-milling process of aluminum semi-solid A356.** The 11 th South East Asian Technical University Consortium (SEATUC) Symposium. 13-14 March 2017, Ho Chi Minh City, Vietnam.



THE STUDY OF MACHINING PARAMETERS ON SURFACE ROUGHNESS IN THE END-MILLING PROCESS OF ALUMINUM SEMI-SOLID A356

Aungsumarin Prapasong ⁽¹⁾, Ukrit Thanasuptawee ⁽²⁾, Prasert Aengchuan ⁽³⁾
, Somsak Siwadamrongpong ⁽⁴⁾

(1), (2), (3), (4) School of Manufacturing Engineering, Suranaree University of Technology,
Nakhonratchasima, Thailand 30000

Email: somsaksi@sut.ac.th

ABSTRACT

This investigation purposes are to study the factors affected the surface roughness in the end-milling process of aluminum semi-solid A356. Surface roughness is an important measure of the quality for part manufacturing. The results of this research could be applied in manufacturing of automotive components industry. The process in preparation of semi-solid aluminum alloy used Gas Induced Semi-Solid Squeezed Casting (GISS-SC) and T6 heat treatment process is employed. This study was conducted by using computer numerical controlled (CNC) milling machine. The milling process used carbide end mill cutter of 12 millimeter diameter in face milling. The one eight fraction factorial design of experimental method was carried out. Seven main factors in this study consist of four cutting factors and three factors from tool geometry. The factors were feed per tooth, cutting speed, radial depth of cut, axial depth of cut, rake angle, helix angle and number of teeth. The response factor was surface roughness. This experiment was carried out using CNC milling machine on dry cutting condition. The analysis of the result shows that the significant main effects for surface roughness were feed per tooth, number of teeth, rake angle, cutting speed and radial depth of cut. The major interaction effects for surface roughness were between feed per tooth-rake angle, feed per tooth-cutting speed and feed per tooth-helix angle.

KEYWORDS: end-milling, machining parameter, surface roughness design of experiment.

1. INTRODUCTION

Aluminum is a non-ferrous metal that popular in various industries, due to aluminum has excellent mechanical properties such as corrosion resistance, abrasion resistance, flexibility, fatigue behavior, easier machining, good forming ability and lightweight. Therefore, aluminum demand is growth rapidly in the industrial market.

The production of aluminum alloy parts formed by casting usually contains silicon which is the important chemical composition. It cause easier melting, good fluid flow of metals in casting and the ability to forge is excellent. The conventional die casting process sometimes causes dendritic microstructure and affecting on mechanical properties decreased due to the shrinkage porosity during solidification and gas porosity. Recently, semi-solid metal (SSM) casting process technology which is also known as thixocasting, rheocasting, thixoforming or thixomolding was proposed. Gas induced semi-solid (GISS) technique was the new technique by introducing very fine gas bubbles through the graphite diffuser that dip into the molten alloys. This technique was reported to increase mechanical properties and better response to heat treatment process. In the year 2008, Siriporn et al., studied the influence of heat treatment processing parameters on the mechanical properties and the microstructure of semi-solid aluminum alloy A356. The process in preparation semi-solid aluminum alloy is called Gas Induced Semi-Solid Squeezed Casting (GISS-SC) and the heat treatment

process was T5 and T6. T5 was done by only aging process. T6 was comprised of 3 steps: solution treatment process, quenching and aging process. It was found that the optimum condition of T6 was solution treated at 540°C for 4 hr, quenching and aged at 135°C for 12 hr. with the hardness of 149.90 HV, ultimate tensile strength of 297.07 MPa and elongation of 9.66%.

A brief review of studies on surface roughness of aluminum alloys. Surasit et al., (2013, 2014) carried out the study on main factors for surface roughness in the face milling process of aluminum 6061, semi-solid 2024 and semi-solid AA 7075 using full factorial experimental design. The variable factors were the spindle speed, the feed rate and the depth of cut. The result represented that the main factors effected were the spindle speed and the feed rate. Depth of cut was reported to insignificant. Somsiang et al., (2014) study the factors affecting the surface roughness of 6061-T6 aluminum using 2³ factorial experimental design. The experimental results indicated that the main effect for surface roughness was the feed rate and interaction effect was between depth of cut and feed rate. Elias et al., (2016) carried out research on effect of cutting speed parameters on the surface roughness of Al5083 using full factorial experimental design. The carbide tools coated with TiAlN was used with a diameter of 12 millimeter. The results obtained by increasing of cutting speed and decreasing of feed rate on decreasing of surface roughness while the depth of cut did not affect with the surface roughness. M. Subramanian et al., (2014) created modeling and analysis of surface roughness on AL7075-T6 in end milling process using response surface methodology. Statistical model has been developed to predict surface roughness in terms of tool geometry such as rake angle, nose radius of cutting tool and machining parameters such as cutting speed, cutting feed rate and axial depth of cut. The experiment was carried out with HSS end mill (12 millimeter diameter). The results indicated that minimum surface roughness can be achieved by radial rake angle of 12°, nose radius of 0.8 millimeter, cutting speed of 115 m/min, cutting feed of 0.04 mm/tooth and axial depth of cut of 2 millimeter.

Aluminum A356 is a magnesium-silicon-aluminum alloy. It is extensively used in the manufacturing of automotive components industry such as engine parts, wheel, shock, OEM parts, and others. These products have to go through the machining processes by milling machine and cutting tool. These processes affected on surface roughness of product. Surface roughness is an important measure of the production quality that effects on the mechanical properties of materials. It could be begot some problems that are significant such as degradation of quality surface, which effecting to durability and precision of

products. Therefore, Surface roughness had an impact on the mechanical properties.

This study was interested in studying the factors affected the surface roughness in the end-milling process of aluminum semi-solid A356 that casting process technology using gas induce semi-solid (GISS) process. The seven main factors in this study consist of four cutting factors which were feed per tooth, cutting speed, radial depth of cut and axial depth of cut. The rest three geometry tool factors were rake angle, helix angle and number of teeth. The research could be benefited in the manufacture of automotive components industry and reduce cost and time for the more manufacturing quality.

2. CASTING METHOD FOR ALUMINUM SEMI-SOLID A356

The process in preparation of semi-solid aluminum alloy is called Gas Induced Semi-Solid Squeezed Casting (GISS-SC) by introducing gas bubbles to the molten alloys at a temperature of 700°C for aluminum semi-solid A356. The low solid fraction was created with bubbling time of 6 second before squeeze casting. The slurry was poured into a die cavity. The applied pressure was controlled by hydraulic press. The die and punch were preheated to 300 and 80°C. Figure 1 showed the schematic diagram of the GISS-SC process. Chemical composition of aluminum semi-solid A356 was shown in Table 1 and Figure 2 was shown the microstructure of the casting aluminum semi-solid A356 before the machining operation was performed.

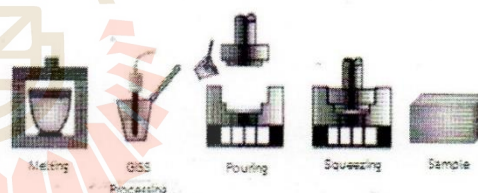


Figure 1. Schematic diagram of the GISS squeeze casting process.

Table 1. Chemical composition of aluminum semi-solid A356.

Si	7.18
Mg	0.215
Fe	0.108
Cu	0.0197
Mn	0.0045
Zn	0.0089
Ti	0.112
Al	Bal.

Materials used in this study was produced by gas induce semi-solid (GISS) technique, from manufacturer. The microstructure of the A356 was globular grains and has shown in figure 2. This grain type cause dense internal microstructure and less shrinkage porosity during solidification. It was due to some metal has been appeared in solid state while flow into the mold and yield to increase on mechanical properties.

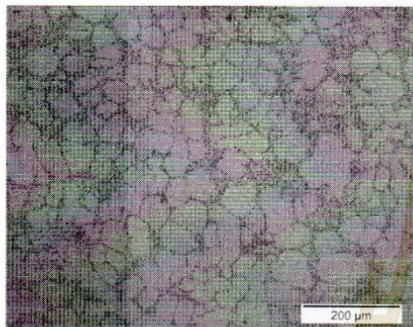


Figure 2. Microstructure of aluminum semi-solid A356

3. EQUIPMENT AND TOOLS

This research aimed to investigate the effect of main factors on the surface roughness in semi-solid A356 end-milling process by computer numerical controlled (CNC) milling machine and using end mill cutter of 12 millimeter diameter. The following equipment and instrument were used.

- 1) Computer numerical controlled (CNC) milling machine of model Bridgeport type VMC-500 16 with technical specifications including a maximum speed of 7,000 rpm and maximum feed rate of 10,000 mm/min.
- 2) Workpiece samples: Semi-solid A 356. The size of the workpiece was 48x48 millimeter cross section and 100 millimeter in length.
- 3) Tool: Fine type carbide tool with 12 millimeter diameter.
- 4) A surface roughness measuring device of model Mitutoyo Surf Test SJ-210.

4. EXPERIMENT

This experiment used computer numerical controlled (CNC) milling machine on condition of dry cutting in the face end-milling process. Set up configuration using carbide end mill cutter of 12 millimeter diameter was employed as shown in figure 3. Figure 4 has shown an

experimental processes flowchart. These were detailed as follows:

- 1) Parameters and Response were selected. Seven main factors were shown in table 2 and the response factor of this research was the surface roughness.
- 2) Design of experiment technique was used to carry out the investigation. 2^{7-3} Design of experiment was employed in this study, totally 16 cutting conditions was determined.
- 3) 480 square millimeter of milling area was cut continuously for each condition. The surface roughness (Ra) was measured for 3 points per milling row. Value of average and standard deviation of each cutting conditions were reported.
- 4) The analysis of variance of surface roughness value with using program Minitab R.16

Table 2. Parameters and levels of test.

Factors	Unit	Symbol	Level	
			(-1)	(+1)
Feed per tooth	mm/z	f_z	0.02	0.04
Cutting speed	m/min	V_c	215	245
Axial depth of cut	mm	A_p	0.4	0.8
Radial depth of cut	mm	A_e	3	6
Helix angle	degrees	Helix	35	45
Rake angle	degrees	Rake	10	14
Number of teeth	cutter	Z	2	3

The following equation have been used to set the experimental cutting conditions

$$\text{Cutting speed} \quad V_c = \frac{D \times \pi \times n}{1000} \quad (1)$$

$$\text{Spindle Speed} \quad n = \frac{V_c \times 1000}{\pi \times D} \quad (2)$$

$$\text{Feed per Tooth} \quad f_z = \frac{V_f}{Z \times n} \quad (3)$$

$$\text{Cutter feed} \quad V_f = f_z \times Z \times n \quad (4)$$

D = Diameter of cutter in millimeter

Z = Number of teeth in cutter

n = Spindle speed in rpm

V_f = Cutter feed in millimeter /min

f_z = Feed per tooth in millimeter/z

V_c = Cutting speed in meters/min

π = 3.1416

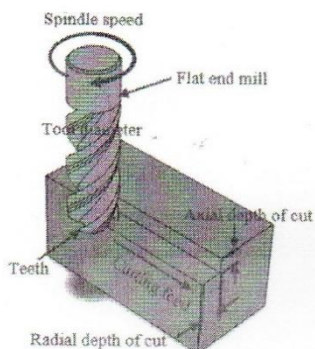


Figure 3. Show the face end-milling process.

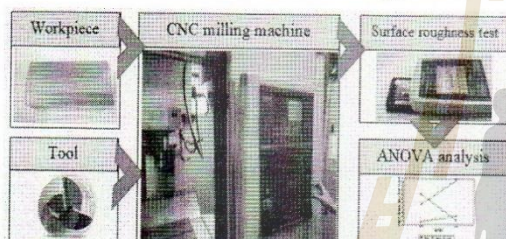


Figure 4. Experimental processes flowchart.

5. EXPERIMENTAL RESULTS AND DISCUSSIONS

Table 3 shows 16 experimental results.

Std.	f_z	V_c	A_p	A_e	Z	Helix	Rake	Ra(μm)
1	0.02	215	0.4	3	2	35	10	0.151
2	0.04	215	0.4	3	3	35	14	0.564
3	0.02	245	0.4	3	3	45	10	0.262
4	0.04	245	0.4	3	2	45	14	0.429
5	0.02	215	0.8	3	3	45	14	0.208
6	0.04	215	0.8	3	2	45	10	0.344
7	0.02	245	0.8	3	2	35	14	0.237
8	0.04	245	0.8	3	3	35	10	0.415
9	0.02	215	0.4	6	2	45	14	0.209
10	0.04	215	0.4	6	3	45	10	0.621
11	0.02	245	0.4	6	3	35	14	0.337
12	0.04	245	0.4	6	2	35	10	0.311
13	0.02	215	0.8	6	3	35	10	0.316
14	0.04	215	0.8	6	2	35	14	0.576
15	0.02	245	0.8	6	2	45	10	0.167
16	0.04	245	0.8	6	3	45	14	0.673

average surface roughness for each condition.

Table 3. The experiment results.

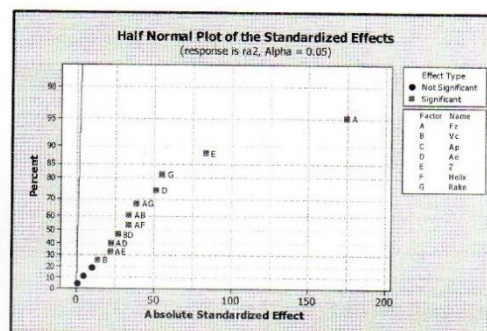


Figure 5. Half Normal Plot.

Figure 5 has shown the half normal plot. This plot revealed that the significant main effect were A, E, G, D and B and the significant interaction effect were AG, AB, AF, BD, AD and AE.

Table 4. Analysis of variance of surface roughness value

Analysis of Variance for Ra using Adjusted SS Tests						
Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Main Effects	7	0.371450	0.371450	0.053064	6193.43	0.010
Fz	1	0.261728	0.261728	0.261728	30547.82	0.004
Vc	1	0.001564	0.001564	0.001564	182.59	0.047
Ap	1	0.000175	0.000175	0.000175	20.46	0.139
Ae	1	0.022509	0.022509	0.022509	2627.20	0.012
Z	1	0.059318	0.059318	0.059318	6923.31	0.008
Helix	1	0.000002	0.000002	0.000002	0.20	0.730
Rake	1	0.026153	0.026153	0.026153	3052.46	0.012
2-Way Interactions	7	0.047510	0.047510	0.006787	792.17	0.027
Fz*Vc	1	0.009840	0.009840	0.009840	1148.51	0.019
Fz*Ap	1	0.000813	0.000813	0.000813	94.87	0.065
Fz*Ae	1	0.004189	0.004189	0.004189	488.87	0.029
Fz*Z	1	0.003973	0.003973	0.003973	463.70	0.030
Fz*Helix	1	0.009787	0.009787	0.009787	1142.25	0.019
Fz*Rake	1	0.012927	0.012927	0.012927	1508.81	0.016
Vc*Ae	1	0.005982	0.005982	0.005982	698.20	0.024
Residual Error	1	0.000009	0.000009	0.000009		
Total	15	0.418968				
S = 0.00292708 PRESS = 0.00219336 R-Sq = 100.00%						
R-Sq(pred) = 99.48% R-Sq(adj) = 99.97%						

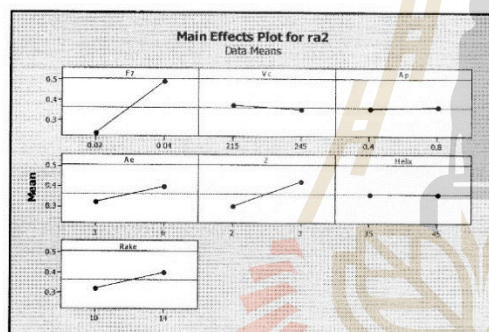
From table 4 could be analyzed the variance of surface roughness of Aluminum Semi-Solid A356. There were detailed as follows:

- 1) The regression model from the ANOVA analysis was revealed the excellent relation between significant parameters and surface roughness. These could be implied from the decision coefficient (R^2) of 100% and the adjusted R^2 of 99.97%.
- 2) The main effect of the factors on the surface roughness were feed per tooth, cutting speed, radial

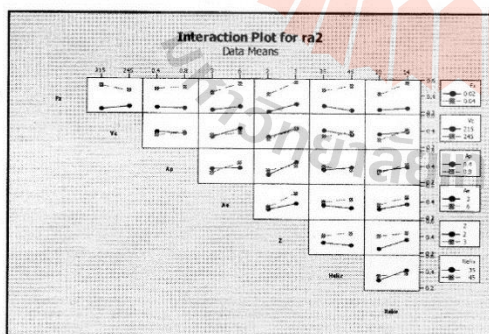
depth of cut, number of teeth and rake angle which p-value of the such main factors less than 0.05.

- 3) The interaction effect of the factors on the surface roughness were between feed per tooth-rake angle, feed per tooth-cutting speed, feed per tooth-helix angle, cutting speed-radial depth of cut, feed per tooth-radial depth of cut and feed per tooth-number of teeth which p-value of such interaction factors less than 0.05.

Figure 6 has shown the individual parameters of machining on the surface roughness. Feed per tooth was the highest significant effects on surface roughness. The Feed per tooth also had the significant interaction with 5 parameters. It could be considered that feed per tooth was the major parameter which affect to surface roughness. Increasing of feed per tooth would yield the better surface roughness. The number of teeth, rake angle and radial depth of cut were considered as significant parameters in the second rank. The good surface roughness should be achieved by setting feed per tooth, number of teeth, rake angle and radial depth of cut in low condition.



(a)



(b)

Figure 6. Individual parameters of machining effect on the surface roughness: (a) main effects and (b) interactions. Half-fraction factorial method.

6. CONCLUSION

The surface roughness of semi-solid A356 was investigated by "Fractional Factorial design" method. Seven parameters were brought into the experiment with face end-milling process. The results of the analysis are as follows:

- 1) Feed per tooth was the highest significant parameter on surface roughness. The decreasing of feed per tooth, number of teeth, rake angle and radial depth of cut to effect surface roughness decreased.
- 2) The significant interaction effects of the factors on the surface roughness were between feed per tooth-rake angle, feed per tooth-cutting speed, feed per tooth-helix angle, cutting speed-radial depth of cut, feed per tooth-radial depth of cut and feed per tooth-number of teeth.

REFERENCES

- Siriporn Kuntongkam, "Influence of Heat Treatment Process Parameters on the Mechanical Properties and the Microstructure of Semi-Solid A356 Aluminum Alloy," *Journal of Metals, Materials and Minerals*, vol. 18, no. 2, pp. 93-97, 2008.
- Surasit Rawangwong, Worapong Boonchouytan, Jaknarin Chatthong, and Romadorn Burapa, "An Investigation of Optimum Cutting Conditions in Face Milling Semi-Solid Cast 6061 Aluminum Alloy Using Carbide Tool," *Advanced Materials Research*, vol. 747, pp. 777-780, 2013.
- Surasit Rawangwong, Jaknarin Chatthong, Worapong Boonchouytan and Romadorn Burapa, "An Investigation of Optimum Cutting Conditions in Face Milling Aluminum Semi Solid 2024 Using Carbide Tool," *Energy Procedia* 34, pp. 854 – 862, 2013.
- Surasit Rawangwong, Jaknarin Chatthong, Worapong Boonchouytan and Romadorn Burapa, "Influence of Cutting Parameters in Face Milling Semi-Solid AA 7075 Using Carbide Tool Affected the Surface Roughness and Tool Wear," *Energy Procedia* 56, pp. 448 – 457, 2014.
- Somsiang Chantasee and Sirichai Punsomsakul, "Surface Roughness Prediction of 6061-T6 Aluminum Alloy in Milling Using Regression Model," *KKU Res. J.*, pp. 261-221, 2014.
- Elias Rezvani, Hamid Ghayour, and Masoud Kasiri, "Effect of cutting speed parameters on the surface roughness of Al 5083 due to recrystallization," *Mechanical Sciences*, 7, 2016, pp. 85-91.

M.Subramanian, M.Sakthivel, R.Sudhakaran,
 “Modeling and Analysis of Surface Roughness of
 AL7075-T6in End Milling Process Using Response
 Surface Methodology,” Arab J SciEng, 2014, vol. 39,
 pp. 7299–7313.

PHOTOS AND INFORMATION

	<p>Aungsumarin Prapaspong received the B.E. (2014) degree in Manufacturing Engineering from Suranaree University of Technology. She is studying in degree of master, School of Manufacturing Engineering, Suranaree University of Technology.</p>
	<p>Ukrit Thanasuptawee received the B.E. (2009) degrees in Industrial Engineering from Rajamangala University of Technology Lanna, M.E. (2011) degrees in Industrial Engineering from Chiang Mai University. He is studying in degree of Ph.D., School of Manufacturing Engineering, Suranaree University of Technology.</p>
	<p>Prasert Aengchuan received the B.E. (2002) degree in mechanical engineering from Mahidol University, M.E. (2005) degrees in Industrial System Engineering from Asian Institute of Technology, and D.E. (2015) degree in Industrial Engineering from Thammasat University. He is a lecturer, School of Manufacturing Engineering, Suranaree University of Technology.</p>
	<p>Somsak Siwadamrongpong received the B.E. (1995) degree in Mechanical Engineering from Chulalongkorn University, M.E. (2001) degree in Environmental System from Nagaoka University of Technology, and D.E. (2004) degree in Energy and Environment from Nagaoka University of Technology. He is a lecture, School of Manufacturing Engineering, Suranaree University of Technology</p>

ประวัติผู้เขียน

นางสาวอังศุมารินทร์ ประภาสพงษ์ เกิดเมื่อวันที่ 1 กันยายน พ.ศ. 2535 ที่อยู่เลขที่ 162/1 ซอยป่าไม้ ถนนหนองกะจะ ตำบลปากช่อง อำเภอปากช่อง จังหวัดนครราชสีมา

ประวัติการศึกษา

ศึกษาชั้นประถมศึกษาและมัธยมศึกษาตอนต้น ที่โรงเรียนรุ่งอรุณวิทยา จังหวัดนครราชสีมา ศึกษาชั้นมัธยมศึกษาตอนปลาย ที่โรงเรียนปากช่อง จังหวัดนครราชสีมา สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา เมื่อปี พ.ศ. 2557 ปัจจุบันกำลังศึกษาต่อในระดับปริญญาโท วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา โดยได้รับทุนการศึกษา “ ทุนผู้มีศักยภาพระดับบัณฑิตศึกษา ” จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ประสบการณ์

เมื่อปี พ.ศ. 2557 ได้สหกิจศึกษา ณ บริษัท ไทยโตเคน เทอร์โม จำกัด ตำแหน่งผู้ช่วยวิศวกร ในแผนก QUALITY ASSURANCE DEPARTMENT เป็นเวลา 4 เดือน ขณะที่กำลังศึกษาต่อในระดับมหาบัณฑิตนั้น ได้มีประสบการณ์โดยเป็นผู้ช่วยสอนในรายวิชา ดังนี้

- 1) ปฏิบัติการกระบวนการแปรรูปและการเชื่อมต่อ
- 2) คอมพิวเตอร์เพื่อการออกแบบเบื้องต้น
- 3) ปฏิบัติการกระบวนการผลิต
- 4) กรรมวิธีการผลิตและปฏิบัติการผลิต

ในระหว่างการศึกษาปริญญาโทได้นำเสนอผลงานทางวิชาการในหัวข้อ THE STUDY OF MACHINING PARAMETERS ON SURFACE ROUGHNESS IN THE END-MILLING PROCESS OF ALUMINUM SEMI-SOLID A356 ในการสัมมนาวิชาการ SOUTH EAST ASIAN TECHNICAL UNIVERSITY CONSORTIUM SYMPOSIUM หรือ SEATUC ครั้งที่ 11 เมื่อ 13-14 มีนาคม 2560 ณ Ho Chi Minh City University of Technology นครโฮจิมินห์ ประเทศเวียดนาม รายละเอียดดังแสดงในภาคผนวก ก